

# 脉冲控制在励磁电力系统中的应用研究

李书舟, 刘 斌

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412008)

**摘要:** 介绍了电力系统励磁模块控制方式的发展现状, 提出一种新的励磁系统控制方法——脉冲控制, 阐述了脉冲控制的原理并建立鲁棒稳定性判据, 给出励磁系统的数学模型并将脉冲控制应用到系统中; 最后通过 MATLAB 软件在电力系统受到小扰动时, 分别对励磁系统使用传统的 AVR+PSS 控制及脉冲控制, 观察仿真波形; 结果表明使用脉冲控制克服了原控制器超调大、响应速度慢等缺点, 显著改善了系统性能。

**关键词:** 电力系统; 励磁; 脉冲控制; MATLAB

**中图分类号:** TM761+.11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2007)02-0088-04

## The Application Research of Impulsive Control in Excitation Power System

Li Shuzhou, Liu Bin

(College of Electric & Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

**Abstract** After introducing the current development of the excitation control method in power system, a novel control strategy ---impulsive control is proposed and a set of stability criteria for uncertain impulsive dynamical system and its principle are expounded. Then shows the mathematical model in excitation system and uses impulsive control in this system. Finally, it uses the AVR+PSS and impulsive control in excitation system respectively and observes the curve difference in Matlab when power system is changed into small disorder. The results indicate that using impulsive control can achieve faster convergence speed and faster response and improve the performance of the system remarkably.

**Key words:** power system; excitation system; impulsive control; MATLAB

## 0 引言

在所有电力系统的复杂现象中, 电力系统稳定性最难理解且最富挑战性。励磁调节作为有效的提高电力系统稳定性的重要手段, 历年来受到了科研和设计人员的重视。而励磁技术的发展除了励磁方式的发展和改进外, 更重要的是励磁调节器控制方式的改进与发展。传统的基于比例控制方式的自动调压器 AVR<sup>[1]</sup>, 已很难适应励磁系统设计的要求, 特别是对于容量较大的机组。于是, PID 控制方式逐渐取代了比例式的自动励磁调节器, 而单纯的 PID 调节对抑制低频振荡的作用是有限的。为了抑制低频振荡, 弥补 AVR 的不足, 出现了 AVR+PSS<sup>[2]</sup>的励磁控制方式, 取得了不错的

控制性能。随着控制理论不断发展, 涌现出许多新的控制方法, 如线性最优励磁控制系统<sup>[3]</sup>, 在 AVR+PSS 系统的基础上使控制性能得到了进一步提高。本文介绍一种新型的使用脉冲控制<sup>[4-6]</sup>作为励磁控制方式的励磁系统, 并对其设计出脉冲控制器, 最后使用 MATLAB 软件做出仿真。对比使用 AVR+PSS 控制及脉冲控制系统的仿真图形, 结果表明, 使用脉冲控制后改善了励磁系统的性能。

## 1 脉冲控制在不确定系统的稳定性分析中的应用

脉冲控制是上世纪 90 年代的科学家们提出的一种

收稿日期: 2006-12-19

作者简介: 李书舟 (1979-), 男, 湖南宁乡人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力系统稳定性;

刘 斌 (1966-), 男, 湖南邵阳人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定性和脉冲控制理论。

新型控制方式。科学家 Rulkov 在从混沌系统中获取信号时, 为了克服混沌系统易受外界干扰的特性, 首次使用了脉冲控制, 并取得了成功。由于脉冲控制不需要连续给系统控制量, 只是每隔一定时间对系统加以控制, 这样的特性使脉冲控制不易受到外界信号的干扰, 从而获得优良的控制性能。因此, 脉冲控制吸引了许多研究者的兴趣, 发展也越来越快, 现已运用到混沌系统、生态管理系统、金融市场的投资控制<sup>[7]</sup>等经济发展所需的各方面。

脉冲控制针对如下不确定动态系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(t, x) + \varphi(t, x), \\ y = h(x). \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中  $x \in R^n$  是状态变量,  $y \in R^m$  是输出变量,  $f(t, x)$  和  $h(x)$  在它们相互独立的定义域内是连续函数, 而函数  $\varphi(t, x)$  表示系统结构的不确定性或者说系统不稳定的特性, 并且有:

$$\varphi \in \Omega_\varphi \triangleq \{ \varphi : \varphi(t, x) = e_\varphi(t, x) \cdot \delta_\varphi(t, x), \|\delta_\varphi(t, x)\| \leq \|m_\varphi(t, x)\| \}.$$

式中,  $e_\varphi$  是  $R^+ \times R^n \rightarrow R^{n \times m}$  的映射,  $\delta_\varphi : R^+ \times R^n \rightarrow R^m$  是一个矢量值未定的函数, 其范数值被另一范数  $m_\varphi : R^+ \times R^n \rightarrow R^n$  限定。 $\|\cdot\|$  表示在  $R^n$  中的欧几里德范数。

系统(1)的脉冲控制法则由序列  $\{t_k, u_k(y(t_k))\}$  决定, 其中  $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_k < \dots, t_k \rightarrow \infty, k \rightarrow \infty, u_k(y)$  是一个连续函数:  $R^m \rightarrow R^n$ 。由此脉冲控制法则, 系统(1)变为如下脉冲动态系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(t, x) + \varphi(t, x), t \neq t_k; \\ y = h(x), t \neq t_k; \\ \Delta x = u_k(y), t = t_k; \\ x(t_0) = x_0, k = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\Delta x(t_k) = x(t_k^+) - x(t_k^-) = x(t_k^+) - x(t_k)$

如果系统(1)存在脉冲控制法则  $\{t_k, u_k(y(t_k))\}$ , 使得系统(1)渐进稳定, 则我们称系统(1)为鲁棒脉冲稳定, 系统(2)为鲁棒渐进稳定。由此, 容易想到的问题是对于系统(1), 怎样确定一个脉冲控制法则  $\{t_k, u_k(y(t_k))\}$ , 使得系统(2)鲁棒渐进稳定。

**定理 1** 假设

- (i) 存在  $\rho_0 \in (0, \rho)$  使得  $x \in S_{\rho_0}$  满足  $x + I_k(x) \in S_\rho, k \in N_0$
- (ii)  $V \in v_0$ , 并且存在  $a, b \in K$  使得

$$b(\|x\|) \leq V(t, x) \leq a(\|x\|). \quad (3)$$

其中  $(t, x) \in R^+ \times S_\rho$ 。

- (iii) 存在  $v_k \in R$  及  $d_k \in K$  使得

$$V(t_k^+, x_k + I_k(x_k)) \leq V(t_k, x_k) + v_k \cdot d_k(V(t_k, x_k)). \quad (4)$$

其中  $x_k = x(t_k), k \in N_0$ 。

- (iv)  $V(t, x(t))$  在  $t \neq t_k$  时是可微分的, 存在  $c_k \in K, \lambda_k \in C[R^+, R^+], \mu_k \in R$ , 使得 Hamilton-Jacobi 不等式

满足:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} f + \frac{\lambda_k^2(t)}{2} \frac{\partial V}{\partial x} e_\varphi e_\varphi^\top \frac{\partial V}{\partial x} + \\ \frac{1}{2\lambda_k^2(t)} m_\varphi^\top m_\varphi \leq \frac{\mu_k}{\Delta t_k} \cdot c_k(V(t, x)), \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $(t, x) \in R^+ \times S_\rho, k \in N_0$ 。

- (v)  $u_k + v_k \leq 0$ , 对于  $s \in (0, \rho)$ , 有:

$$C_k(s) \leq d_k(s), \text{ if } v_k < 0; \quad (6)$$

$$d_k(s) < c_k(s), \text{ if } v_k < 0. \quad (7)$$

若系统满足假设(i-v), 则系统(2)为李亚普诺夫鲁棒稳定, 在此前提下如果级数  $\sum_{k=1}^{\infty} (u_k + v_k) g_k(s) = -\infty, g_k(s) = \max\{c_k(s), d_k(s)\}$  对  $s > 0$  成立, 则称系统(2)鲁棒渐进稳定。

**证明** 对任意  $(t, x) \in (t_k, t_{k+1}) \times S_\rho, V(t, x(t))$  在  $t \neq t_k$  时是可微分的,  $c_k \in K, \lambda_k \in C[R^+, R^+]$  可得:

$$\begin{aligned} D^+V(t, x) &= \frac{\partial V(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} f(t, x) + \\ &\frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \varphi(t, x) = \frac{\partial V(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} f(t, x) + \\ &\frac{\partial V(t, x)}{\partial x} e_\varphi(t, x) \delta_\varphi(t, x) \leq \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial t} f + \\ &\frac{\lambda_k^2(t)}{2} \frac{\partial V}{\partial x} e_\varphi e_\varphi^\top \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{2\lambda_k^2(t)} m_\varphi^\top m_\varphi \leq \\ &\frac{\mu_k}{\Delta t_k} \cdot c_k(V(t, x)). \end{aligned}$$

因此, 我们能使用定理 1<sup>[8]</sup>的结论, 这里省略证明过程。

**定理 2** 如果存在脉冲控制法则  $\{t_k, u_k(y)\}$ , 使得数  $\rho_0 \in (0, \rho), x \in S_{\rho_0}$ , 满足  $x + u_k(h(x)) \in S_\rho$ , 其中  $k=1, 2, \dots$ 。

- (i) 存在  $V(t, x) \in C^2[R^+ \times R^n, R^+], v_k \in R$  和  $d_k \in K$  满足等式

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} f + \frac{\lambda_k^2(t)}{2} \frac{\partial V}{\partial x} e_\varphi e_\varphi^\top \frac{\partial V}{\partial x} + \\ \frac{1}{2\lambda_k^2(t)} m_\varphi^\top m_\varphi \leq w(t)G(t, x). \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $(t, x) \in R^+ \times S_\rho, \omega : R^+ \rightarrow R, G : R^+ \times R^n \rightarrow R^+$  是连续的, 且  $\frac{\partial^2 V(t, x)}{\partial x^2} \leq 0, (t, x) \in R^+ \times S_\rho$ 。

$\frac{\partial^2 V(t, x)}{\partial x^2}$  是一个  $n \times n$  矩阵, 此矩阵是个半正定矩阵。使得

$$\frac{\partial V}{\partial x}(t_k, x) \cdot u_k(h(x)) \leq v_k d_k(V(t_k, x)), x \in S_\rho. \quad (10)$$

- (ii) 存在  $p_k \in PC$  和  $C_k \in K$  使得对于所有  $(t, x) \in (t_k, t_{k+1}) \times S_\rho, w(t)G(t, x) \leq p_k(t) \cdot c_k(V(t, x)); \quad (11)$

(iii) 存在  $\sigma > 0$  和  $\gamma_k \geq 0$ , 且  $\sum_{k=1}^{\infty} \gamma_k = +\infty$ , 使得对于所有  $z \in (0, \sigma)$  有

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} p_k(s) ds + \int_z^{z+v_k d_k(z)} \frac{ds}{c_k(s)} \leq -\gamma_k, \quad (12)$$

则系统 (1) 为鲁棒脉冲稳定。

**证明** 由  $V \in C^2[R^+ \times R^n, R^+]$ , 我们可得到:

$$\begin{aligned} V(t_k^+, x_k + u_k(h(x_k))) &= V(t_k, x_k) + \\ &\frac{\partial V}{\partial x}(t_k, x_k) \cdot u_k(h(x_k)) + \\ &\frac{1}{2} u_k(h(x_k))^T \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}(t_k, \varsigma) u_k(h(x_k)) \circ \end{aligned}$$

其中  $\varsigma$  是连接  $0$  与  $x_k$  的线段上的一点。由此, 通过式(9)可得:

$$\begin{aligned} V(t_k^+, x_k + u_k(h(x_k))) &\leq V(t_k, x_k) + \\ &\frac{\partial V}{\partial x}(t_k, x_k) u_k(h(x_k)), x \in S_\rho \circ \end{aligned}$$

从而由式 (4) 可得:  $V(t_k^+, x_k + u_k(x_k)) \leq V(t_k, x_k) + v_k \cdot d_k(V(t_k, x_k))$ ,  $x \in S_\rho$ , 这与定理 1 的 (iii) 相符。

由 (ii) 和式 (8) 可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} f + \frac{\lambda_k^2(t)}{2} \frac{\partial V}{\partial x} e_\phi e_\phi^T \frac{\partial V}{\partial x} + \\ \frac{1}{2\lambda_k^2(t)} m_\phi^T m_\phi \leq \frac{\mu_k}{\Delta t_k} \cdot c_k(V(t, x)) \circ \end{aligned}$$

其中  $(t, s) \in R^+ \times S_\rho$ ,  $k \in N$ , 这与定理 1 的 (iv) 相符, 定理得到证明。

## 2 脉冲控制在励磁控制系统中的应用

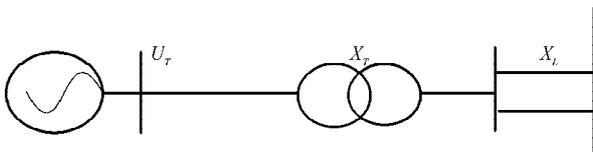


图 1 单机无穷大系统

Fig. 1 Schematic diagram of one-machine infinite-bus system

图 1 所示为单机无穷大系统, 本节将描述励磁脉冲控制系统的数学模型<sup>[5, 6]</sup>:  $\Delta \delta = \Delta \omega$ , (13)

$$\frac{T_J}{\omega_0} \Delta \dot{\omega} = \Delta P_m - \Delta P_e - \frac{D}{\omega_0} \Delta \omega. \quad (14)$$

其中  $\delta$  为发电机功角,  $\omega$  为电机角速度,  $T_J$  为发电机的惯性时间常数,  $\Delta P_m$  为原动机的机械输出功率,  $D$  为风阻系数。而电磁功率  $\Delta P_e$  是发电机  $q$  轴暂态电势增量  $\Delta E'_q$  和  $\Delta \delta$  的函数, 即  $\Delta P_e = f_1(\Delta E'_q, \Delta \delta)$ 。同样, 电磁功率  $\Delta P_e$  是发电机  $q$  轴电势增量  $\Delta E_q$  和  $\Delta \delta$  的函数, 即  $\Delta P_e = f_2(\Delta E_q, \Delta \delta)$ 。于是有:

$$\Delta P_e = S'_E \Delta \delta + R'_E \Delta E_q, \quad (15)$$

$$\Delta P_e = S'_E \Delta \delta + R'_E \Delta E'_q. \quad (16)$$

式中:  $S'_E = \frac{\partial f_2}{\partial \delta}$ ,  $R'_E = \frac{\partial f_2}{\partial E'_q}$ ,  $S'_E = \frac{\partial f_1}{\partial \delta}$ ,

$R'_E = \frac{\partial f_1}{\partial E'_q}$ , 并且有  $\frac{R'_E}{R_E} = \frac{X_{d\Sigma}}{X'_{d\Sigma}}$ 。其中  $X'_{d\Sigma} = X'_d + X_s$ ,

$X_{d\Sigma} = X_d + X_s$ ,  $X'_d$  为  $d$  轴暂态电抗,  $X_d$  为  $d$  轴电抗,  $X_s$  为外部电抗。将式 (15)、(16) 代入式 (13)、(14), 计

$\Delta P_D = \frac{D}{\omega_0} \Delta \omega$  可得:

$$\frac{T_J}{\omega_0} \Delta \dot{\omega} = \Delta P_m - S'_E \Delta \delta - S'_E \Delta E'_q - \frac{D}{\omega_0} \Delta \omega, \quad (17)$$

$$\frac{T_J}{\omega_0} \Delta \dot{\omega} = \Delta P_m - S_E \Delta \delta - R_E \Delta E_q - \frac{D}{\omega_0} \Delta \omega, \quad (18)$$

由式 (15)、(16) 可解得:

$$\Delta E_q = \frac{S'_E - S_E}{R_E} \Delta \delta + \frac{R'_E}{R_E} \Delta E'_q. \quad (19)$$

其中励磁机的方程为:

$$\Delta \dot{E}_{fd} = -\frac{1}{T_e} \Delta E_{fd} + \frac{1}{T_e} \Delta U_R. \quad (20)$$

$\Delta E_{fd}$  为正比于励磁绕组电压  $U_f$  的励磁电势,  $T_e$  为励磁时间常数,  $U_R$  为励磁调节器的输出电压。

由式 (13~20) 可推出系统的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{P}_e \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{S'_E - S_u}{T'_d S_u} & S'_E & -\frac{R_u S_E}{T'_d S_u} \\ -\frac{\omega_0}{T_J} & -\frac{D}{T_J} & 0 \\ \frac{S'_E - S_u}{T'_d R_u S_u} & \frac{S'_E - S'_u}{R_u} & -\frac{S_E}{T'_d S_u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_e \\ \Delta \omega \\ \Delta U_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R'_E}{T'_{d0}} \\ 0 \\ \frac{R'_E}{T'_{d0} R_u} \end{bmatrix} \Delta E_{fd}. \quad (21)$$

其中  $U_i$  为发电机端电压。

将特定的单机无穷大系统的参数数值代入式 (21), 可得系数矩阵方程分别为 (设为  $A$ 、 $B$ ):  $A = [-0.039 \quad 1.275 \quad -0.303; -78.540 \quad -0.5 \quad 0; -0.036 \quad -0.132 \quad -0.273]$ ,  $B = [0.067; 0; 0.060]$ 。

由脉冲控制原理设计出的脉冲控制器为:

$$\Delta x(t_k) = \varepsilon \cdot x(t_k) = u_k(h(x(t_k))) \circ \quad (22)$$

若  $V(x) = \frac{1}{2}(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)$ , 有

$$\frac{\partial V}{\partial x} \cdot u_k(h(x(t_k))) \leq 2\varepsilon \cdot V(x(t_k)),$$

因此  $v_k = 2\varepsilon$ ,  $d_k(s) = c_k(s) = s \circ$

根据本文给出的定理2, 容易求得 $-0.5 < \varepsilon < 0.7398$ , 本文取 $\varepsilon = 0.5$ ,  $\Delta x = 0.1$ , 也就是每隔 $0.1\text{ s}$ 进行控制, 将系统(21)化为离散方程后, 可在MATLAB软件中编写程序实现脉冲控制。

### 3 数值仿真

针对图1所示单机无穷大系统, 可在MATLAB中搭建出电力系统的仿真模型, 励磁系统分别采取AVR+PSS控制与脉冲控制, 取 $\Delta P_e = 0.5$ ,  $\Delta \omega = 0$ ,  $\Delta U_i = 0$ , 观察系统的仿真图形。

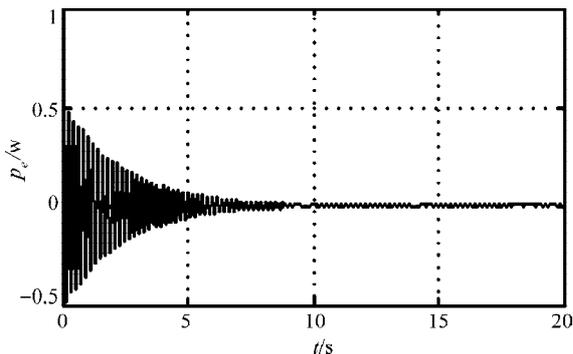


图2 使用 AVR+PSS 线性控制图形  
Fig. 2 The figure used by AVR+PSS control

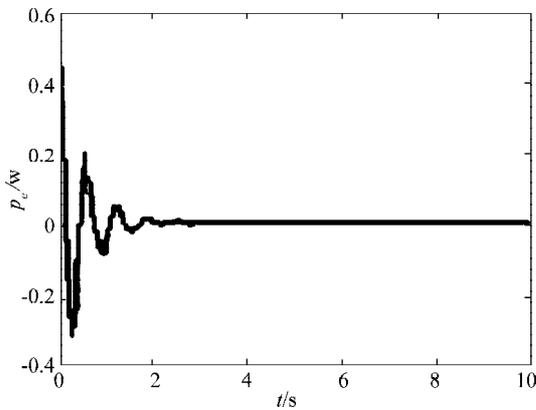


图3 使用脉冲控制图形  
Fig. 3 The figure used by impulsive control

对比图2、3两个仿真图形, 我们可看出, 电力系统受到小扰动后, 使用AVR+PSS控制的励磁系统在 $6\text{ s}$ 左右恢复平衡, 而使用脉冲控制的励磁系统, 系统不到 $2\text{ s}$ 就恢复平衡, 且波形只波动几次, 振幅也略有下降。这表明使用脉冲控制后系统具有更好的抗干扰性能, 显著地提高了系统控制的快速性与稳定性。

### 4 结论

本文对电力系统励磁模块提出了一种新的控制方法——脉冲控制方法。该方法跟踪控制性能好、鲁棒性强, 具有良好的瞬态响应。通过在MATLAB中的仿真表明, 脉冲控制相对于线性最优控制在控制性能上有了进一步的提高, 具有很好的抗干扰性, 是一种理想的控制方法。

参考文献:

- [1] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 杨 梅, 李志军, 刘艳萍, 等. 基于Matlab电力系统稳定器整定[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5): 51-54.
- [3] 刘骏跃. 最优控制理论的现状与发展[J]. 机电工程, 2000, 17(5): 4-6.
- [4] Liu X Z, Rohlf K. Impulsive control of Lotka-Voterra models [J]. IMA J. Math. Control Infor., 1998, 15: 269-284.
- [5] 朱振青. 励磁控制与电力系统稳定[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [6] 卢 强, 王仲鸿, 韩英铎. 输电系统最优控制[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [7] Bensoussan A, Tapiero C S. Impulsive control in management: prospects and applications[J]. J. Opti. Theo. Appl., 1982, 37: 419-442.
- [8] Liu X Z. Impulsive stabilization and control of chaotic systems [J]. Nonlinear Analysis, 2001, 47: 1081-1092.