

# 一种基于离散变结构控制理论的有功分配控制器

宋立忠 卜乐平 姚琼荃

(海军工程大学电气工程系·武汉, 430033)

**摘要:** 对离散变结构控制理论进行研究并提出一种新的趋近律形式: 离散变速趋近律, 其特点是可期待原点的稳定性. 将离散趋近律方法应用于电力系统, 设计了并联运行同步发电机组有功分配的离散变结构控制器. 仿真结果表明, 本文设计的控制器可以明显改善系统的动态性能.

**关键词:** 离散系统; 变结构控制; 趋近律; 电力系统

**文献标识码:** A

## Controller for Active Power Distribution Based on Discrete Variable Structure Control Theory

SONG Lizhong, PU Leping and YAO Qionghui

(Department of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, 430033, P. R. China)

**Abstract:** The discrete variable structure control theory is studied and a new reaching law named variable rate reaching law for which the stability at the origin can be expected is proposed. Applying the reaching law approach to power system, a controller for the distribution of active power of a parallel synchronous generators system is designed. The results of computer simulation show that the controller designed can improve dynamic performance of the system effectively.

**Key words:** discrete-time systems; variable structure control; reaching law; power system

### 1 引言(Introduction)

连续变结构控制已建立起了较为完整的理论体系,并在工程领域的应用研究方面也取得了丰硕成果.但是,由于滑模变结构系统一般采用计算机实现其算法,因而系统是离散的,基于连续滑模变结构理论进行的设计和应用只能算是一种近似方法,而基于离散变结构控制理论的设计和应用却很少见诸文献.本文深入研究了趋近律形式的离散变结构控制,提出了一种新的趋近律形式,并将离散趋近律方法应用于电力系统,针对某型船舶电站存在的实际问题设计了并联运行同步发电机组有功分配的离散变结构控制器.仿真结果显示,本文设计的控制器可以显著改善系统的动态性能,较好地解决了由于机组参数差异及负载突变引起的并联机组间的功率振荡问题.

### 2 系统描述(System description)

考虑这样一个实际系统:两台同步发电机并联运行,发电机型号相同,容量相同;原动机不同,一台为蒸汽透平机,另一台为柴油机.数学模型既应表达出问题的实质,又应在数学上易于处理,在工程上易

于实现.因此,可考虑由转子运动方程、电磁功率增量方程和原动机调速器方程三部分组成系统状态方程,取两机组相应变量之差作为系统的状态变量,最后得系统的线性化状态方程为

$$\dot{x} = Ax + bu, \quad (1)$$

其中

$$x = [\Delta P_e \quad \Delta \omega \quad \Delta P_m]^T, \\ A = \begin{bmatrix} 0 & 2G & 0 \\ -\omega_0 H' / 2 & -DH' & \omega_0 H' / 2 \\ 0 & -T' / 2 & -T' / 2 \end{bmatrix}, \\ b = [0 \quad 0 \quad T' / 2]^T.$$

$\Delta P_e, \Delta \omega, \Delta P_m$  分别为两机组电磁功率、角频率、机械功率标么值增量之差,  $\omega_0$  为额定角频率,  $G = \frac{\partial P_{e1}}{\partial \Delta \delta}$  可近似看作常数,  $\Delta \delta$  为两机功角差,  $H' = 1/H_1 + 1/H_2, T' = 1/T_1 + 1/T_2, H_1, H_2$  为两机组惯性常数,  $T_1, T_2$  为两机组原动机调速器等效时间常数,  $D$  为发电机阻尼系数.

下面的任务就是设计控制器,以使状态变量  $x$  按

令人满意的要求尽快趋于零。

### 3 趋近律方法 (Reaching law approach)

在离散变结构控制理论的发展进程中,曾经出现过三种不等式形式的到达条件<sup>[1-3]</sup>:

$$[s(k+1) - s(k)]s(k) < 0, \quad (2)$$

$$\begin{cases} [s(k+1) - s(k)]\text{sgn}(s(k)) < 0, \\ [s(k+1) - s(k)]\text{sgn}(s(k)) > 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$v(k+1) - v(k) < 0 \text{ 且 } v(k) = \frac{1}{2}[s(k)]^2. \quad (4)$$

1995年,高为炳提出一种等式形式的到达条件<sup>[4]</sup>,即指数趋近律<sup>[5]</sup>的离散形式:

$$s(k+1) = (1 - T\delta)s(k) - T\epsilon \text{sgn}(s(k)), \quad (5)$$

其中  $T$  为采样周期,  $\epsilon > 0, \delta > 0, T\delta < 1$ . 1998年,文<sup>[6]</sup>又提出另外一种等式形式的到达条件:

$$s(k+1) = d_k - d_0 - s_d(k+1). \quad (6)$$

在所有这些到达条件中,高为炳的理论较为完备,在揭示离散变结构控制系统的运动机理方面前进了一大步.所谓离散趋近律方法,就是以指数趋近律(5)为基础的一个理论体系.

考虑离散时间系统:

$$x(k+1) = Ax(k) + bu(k), \quad (7)$$

式中,  $x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}, (A \quad b)$  可控.对式(7)建立变结构控制

$$u = \begin{cases} u^+(x), & s(x) > 0, \\ u^-(x), & s(x) < 0, \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $s$  为切换函数,且有

$$s(x) = cx(k). \quad (9)$$

适当选择切换函数系数矩阵  $c$  中各元素的值,即可保证准滑动模态运动具有渐近稳定性和良好的动态品质.

由式(7),(9)可得:

$$s(k+1) = cAx(k) + cbu(k). \quad (10)$$

令式(10)等于指数趋近律(5)即可求出离散变结构控制律.

$$u = u^\pm(k) = - (cb)^{-1}[cAx(k) - s(k) + T\delta s(k) + T\epsilon \text{sgn}(sk)]. \quad (11)$$

### 4 变速趋近律 (Variable rate reaching law)

指数趋近律具有很多优点,但其缺陷也不容忽视:切换区为带状,当系统在切换带中运动时,最后不能稳定于原点,而其稳态为于原点邻域的一个抖动,如图1(a)所示.图中,两条虚线所夹区域即为切

换区.除指数趋近律外,文<sup>[5]</sup>还提出另外几种形式的趋近律,其对应的离散形式分别为

$$s(k+1) = s(k) - T\epsilon \text{sgn}(s(k)), \quad (12)$$

$$s(k+1) = s(k) - T\epsilon |s|^\alpha \text{sgn}(s(k)), \quad (13)$$

$$s(k+1) = s(k) - Tf(s(k)) - T\epsilon \text{sgn}(s(k)), \quad (14)$$

其中,  $0 < \alpha < 1; f(0) = 0$ , 当  $s \neq 0$  时,  $sf(x) > 0$ . 同指数趋近律一样,它们的切换区也都是带状,系统的稳态为原点邻域的某个抖动.

那么,利用离散趋近律方法能否期待原点的稳定性呢? 回答是肯定的,但必须引入新的趋近律.

我们曾研究过一种变速趋近律<sup>[7]</sup>:

$$\dot{s} = -\epsilon \|x\|_1 \text{sgn}(s), \quad (15)$$

式中,  $\|x\|_1 \triangleq \sum_{i=1}^n |x_i|$  为系统状态范数.将之应用于离散系统,可写出其相应的离散形式:

$$s(k+1) = s(k) - T\epsilon \|x(k)\|_1 \text{sgn}(s(k)). \quad (16)$$

式(16)即为本文要提出的离散变速趋近律.

由式(16)可见,当  $s(k) = 0^+$  时,  $s(k+1) = -T\epsilon \|x(k)\|_1$ ; 当  $s(k) = 0^-$  时,  $s(k+1) = T\epsilon \|x(k)\|_1$ . 在二阶系统中,  $s = \pm T\epsilon \|x(k)\|_1$  是过原点的射线,切换线  $s = 0$  夹在其中.可见,变速趋近律的切换区是厚度为  $2\Delta = 2T\epsilon \|x(k)\|_1$  的扇形,系统的稳态为原点,如图1(b)所示.由式(16),(10)二式可求出以变速趋近律为到达条件的离散变结构控制律:

$$u = u^\pm(k) = - (cb)^{-1}[cAx(k) - s(k) + T\epsilon \|x(k)\|_1 \text{sgn}(s(k))]. \quad (17)$$

变速趋近律(16)的优点是具有良好的稳态性能,可以使系统稳定于原点.但由于引入了状态范数,在系统刚进入切换区的那一段,可能产生大幅度的穿越抖动,这便是变速趋近律的不足之处.

### 5 控制器设计 (Controller design)

通过上面两节的分析研究,不难发现,如果把指数趋近律与变速趋近律结合起来使用,即在趋近模态段和滑动模态段的前期采用指数趋近律决定的控制律(11),而在滑动模态段的后期和稳态段采用变速趋近律决定的控制律(17),则可以克服两种趋近律的缺点,保留它们的优点,从而使系统性能达到最好.两种控制律转换点的选择,可根据实际情况而定,这里我们选择为两种趋近律切换区的交会点,即按下式确定控制律的转换点:

$$T\epsilon = T\epsilon \|x(k)\|_1, \quad (18)$$

于是,可得如下的组合控制策略:

$$u(k) = -(cb)^{-1}[cAx(k) - s(k) + Q], \quad (19)$$

其中

$$Q = \begin{cases} T\delta s(k) + T\epsilon \operatorname{sgn}(s(k)), & \text{当 } \|x(k)\|_1 > 1, \\ T\epsilon \|x(k)\|_1 \operatorname{sgn}(s(k)), & \text{当 } \|x(k)\|_1 \leq 1. \end{cases}$$

将机组参数代入系统(1)并对其进行离散化即可得控制对象模型. 控制器采用单片微型计算机实现其算法. 对于理想准滑动模态运动,即切换面  $s = cx(k) = 0$  上的运动,采用等效控制<sup>[4]</sup>:

$$u(k) = u_e(k) = -(cb)^{-1}c(A - I)x(k). \quad (20)$$

对于非理想准滑动模态,即穿越切换面的抖动,采用式(19)决定的离散变结构控制. 切换函数的选择,也即  $c$  的确定,可参考文[4,8].

## 6 计算机仿真(Computer simulation)

### 6.1 两种趋近律的状态轨迹(State trajectories of two reaching laws)

图1(a)、(b)分别表示采用指数趋近律和变速趋近律两种情况下,离散时间系统(7)的状态轨迹曲线. 仿真参数如下:  $A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & -2 \end{bmatrix}$ ,  $b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ ,  $x(0) = \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.5 \end{bmatrix}$ ,  $c = [-0.8 \ 1]$ ,  $T = 0.06$ ,  $\epsilon = 2$ ,  $\delta = 0.5$ .

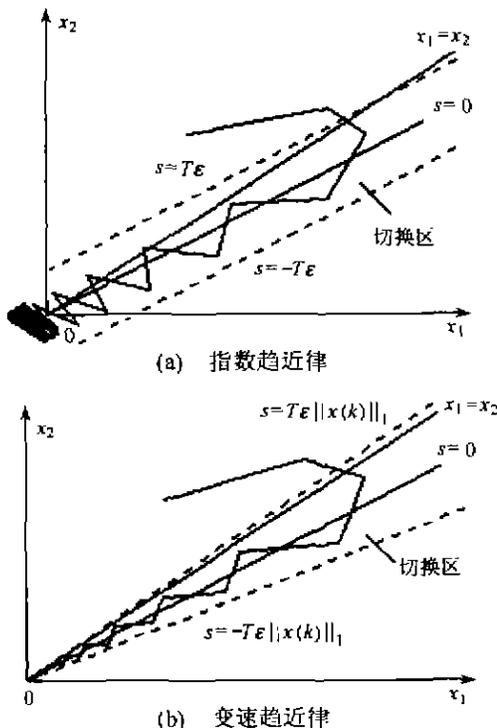
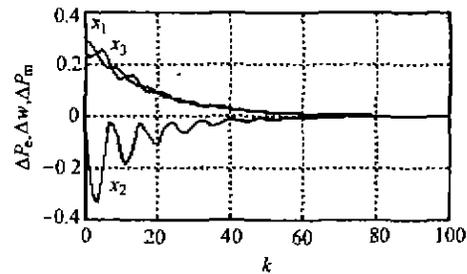


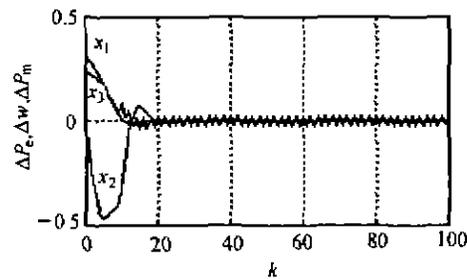
图1 系统状态轨迹  
Fig. 1 State trajectories

### 6.2 负载扰动情况下并联发电机系统的动态响应 (Dynamic response of parallel generator system with load disturbance)

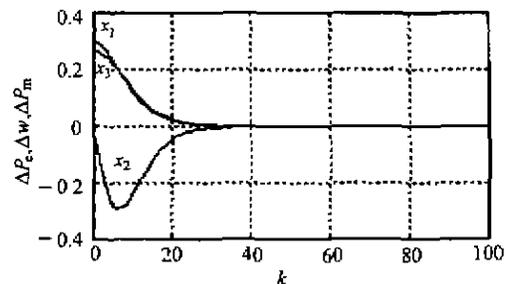
仿真条件为在零时刻突加大负载扰动,引起两机组功率出现较大偏差. 由于本文建立的控制模型即是以两机组相应功率和转速的差值作为状态变量,所以可通过对系统赋以一定初值来仿真其动态过程. 不妨选  $x_0 = [0.3 \ 0 \ 0.3]^T$ , 它表示由于突加扰动,两机组原动机输出的机械功率及发电机输出的电功率均产生30%额定值的偏差. 仿真参数如下:  $H_1 = 3.35$ 秒,  $H_2 = 2.71$ 秒,  $T_1 = 0.09$ 秒,  $T_2 = 0.11$ 秒,  $D = 1.26$ ,  $G = 2$ ,  $\omega_0 = 314.16$ 电弧度/秒,  $c = [0.6 \ 0.2 \ 0.8]$ ,  $\epsilon = 2$ ,  $\delta = 1$ ,  $T = 0.02$ 秒.



(a) 转换反馈控制



(b) 指数趋近律控制策略



(c) 组合控制策略

图2 突加负载情况下并联发电机系统的动态响应  
Fig. 2 System response to load disturbance

图2显示了突加负载情况下并联发电机系统的动态响应曲线, (a)为未加离散变结构控制器,也即并联系统仅仅依靠自身调速器转速反馈的情况, (b)为采用根据指数趋近律设计的控制器的情况, (c)为采用根据组合控制策略设计的控制器的情况. 图中

$x_1, x_2, x_3$  分别代表三个状态变量  $\Delta P_e, \Delta \omega, \Delta P_m$ 。由图可见,利用本文提出的组合控制策略设计的离散变结构控制器明显改善了系统的动态性能,大大减轻了机组间的功率振荡。它仅须  $30 \times T = 0.6$  秒,便使系统完全稳定下来,而加离散变结构控制器前,则需要 1.4 秒。

## 7 结论(Conclusion)

变速趋近律可以期待原点的稳定性。将它与指数趋近律组合使用,可以克服指数趋近律稳态为抖动的缺点。

本文设计的并联运行同步发电机组有功分配的离散变结构控制器,数学模型简单,工程上易于实现。它可以显著改善系统动态性能,较好地解决了并联运行同步发电机组间的功率振荡问题。

## 参考文献(References)

- [1] Dote Y, Hoft R G. Microprocessor based sliding model controller for dc motor drives [A]. Presented at the Industrial Application Society Annual Meeting [C], Cincinnati, OH, 1980
- [2] Sarphuk S Z, Stefanopoulos Y and Kaynak O. On the stability of discrete-time sliding model control systems [J]. IEEE Trans Automatic Control, 1987, 32(10):930 - 932

- [3] Furuta K. Sliding mode control of a discrete system [J]. Systems & Control Letters, 1990, 14(2):145 - 152
- [4] Gao Weibing, Wang Yufu and Homaifa A. Discrete-time variable structure control systems [J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 1995, 42(2):117 - 122
- [5] Gao Weibing, Cheng Mian. Quality control of variable structure control systems [J]. Control and Decision, 1989, 4(4):1 - 6 (in Chinese)
- [6] Bartoszewicz A. Discrete-time quasi-sliding mode control strategies [J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 1998, 45(4):633 - 637
- [7] Yao Qionghui, Huang Jiqi, Wu Hansong. Variable Structure Control Systems [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1997 (in Chinese)
- [8] Gao Weibing. Theory and Design Approach of Variable Structure Control [M]. Beijing: Scienc Press, 1998 (in Chinese)

## 本文作者简介

宋立忠 1969年生,1993年毕业于海军工程大学电气工程系,现任海军某舰副机电部长并在海军工程大学攻读博士学位。研究领域是电力系统自动化与安全运行,变结构控制,智能控制等。

卜乐平 1965年生,1987年毕业于华中理工大学,1990年获海军工程大学硕士学位,现任海军工程大学电气工程系副教授。研究方向是电力系统监测与控制。

姚琼葵 1946年生,1967年毕业于华中理工大学,1981年获南京航空航天大学飞行器自动控制硕士学位,1989年到俄罗斯圣彼得堡理工大学研究自动控制系统,现为海军工程大学电气工程系教授。感兴趣的研究方向是数字控制系统,变结构控制等。