

变结构控制理论中抖振问题的研究

阎 俏, 孙 莹, 李可军

(山东工业大学电力学院, 山东 济南 250061)

摘要: 介绍了变结构控制的基本原理, 分析了变结构控制系统可能引起抖振的原因, 并在此基础上讨论了目前几种具有代表性的削弱抖振的途径。最后, 提出了一种新型的基于模糊控制的减抖方法。

关键词: 变结构控制; 抖振; 模糊控制

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2001)05-0017-03

电力系统是一个非常复杂的强非线性系统, 其运行方式、网络结构及参数具有多变性。因而, 应用现代控制理论解决电力系统的问题效果并不理想, 而变结构控制理论 (Variable Structure Control 简称 VSC) 作为一种控制系统的综合方法, 无论是对于线性系统还是对于非线性系统均有普遍的适用性, 它具有对所控对象模型精度要求较低、进入滑动模态后对系统参数摄动及外界干扰有较强鲁棒性以及控制计算量小、实时性强和快速响应等优点, 这已为电力系统研究者所关注。

近年来, VSC 理论在电力系统负荷频率控制、励磁控制、暂稳控制等方面取得了一系列的研究成果, 但这些常规的 VSC 控制器往往会出现抖振问题。抖振的存在对于电力系统是有害的, 它将使系统最终出现稳态误差, 增加系统能量消耗, 还可能激发系统未建模部分的强烈振动, 不能满足工程要求, 这成为影响它应用的主要问题。因此, 近期学术界对 VSC 理论的研究已经转移到如何削弱并防止抖振发生的研究上来。模糊控制理论属于智能控制论的范畴, 它能够充分利用语言信息、鲁棒性强、易于微机实现, 也是近年来人们研究的热点。针对传统减抖措施(文献^[1,4])的局限性及模糊控制处理不确定问题的优势, 本文提出一种新型的基于模糊控制的削弱抖振的方法。在这方面深入研究, 对 VSC 走向实用有极其重要的现实意义。

1 变结构控制的基本原理

VSC 系统与常规控制系统的不同之处在于系统的“结构”可以在瞬变过程中, 根据系统当时的状态(偏差及其各阶导数等), 以跃变方式, 有目的地变化, 迫使系统沿预定的“滑动模态”的状态轨迹运动。例如, 有一单输入线性系统

$$\dot{X} = AX + Bu \quad X \in R^n, u \in R \quad (1)$$

控制系统的设计也可分为两个独立过程进行, 一是根据所要求的系统性能指标设计切换函数

$$s = C^T X = 0 \quad C = [c_1, c_2, \dots, c_n] \quad (2)$$

最终归结为求 C 阵; 二是在不同条件下满足滑动模态的存在条件和达到条件, 用多种方式综合出 VSC 的控制律

$$u(X) = \begin{cases} u^+(X) & s > 0 \\ u^-(X) & s < 0 \end{cases} \quad (3)$$

使得切换面是滑动模态区, 滑动模态具有完全抗外干扰和抗摄动的特性, 并使系统状态进入并且保持在滑动模态上, 从而保证整个系统的大范围渐进稳定性。

2 抖振产生的机理

2.1 惯性引起滞后产生抖振

VSC 系统中执行机构的物理过程是从切换函数 $s(X)$ 到产生控制力(力矩), 这个力(力矩)加在对象上使它产生运动的变化。由于任何的物理现实系统的能量不可能无限大, 从而使系统的控制力不能无限大, 这就必然使系统的加速度有限, 另外, 系统惯性总是存在, 于是控制的切换必然伴有滞后。滞后模型可分为两种:

(1) 空间滞后

典型的开关模型中

$$\text{sign}(s) = \begin{cases} -1 & \text{当 } s < 0 \\ +1 & \text{当 } s > 0 \end{cases} \quad (4)$$

理想情况下是在 $s = 0$ 处完成切换, 实际上无论何种方式获取 s 均有误差(如传感器的死区、运算的舍入误差等), 实现 $\text{Sign}(s)$ 均有滞环, 所以实际情况是 s 在空间上滞后才切换, 典型的开关模型就表示为(5)式:

$$\text{Hys}(s) = \begin{cases} -1 & \text{当 } s < -\delta \text{ 或 } |s| < \delta, s > 0 \\ +1 & \text{当 } s > +\delta \text{ 或 } |s| < \delta, s < 0 \end{cases} \quad (5)$$

(2) 时间滞后

sign(s)理想情况下是在 s = 0 处瞬时完成切换,但由于切换延能和能量有限等实际因素的制约使其不可能实现,典型的开关模型就表示为(6)式:

$$Hys(s) = \begin{cases} -1 & \text{当 } t < t_0 +, s > 0 \text{ 或 } t > t_0 +, s < 0 \\ +1 & \text{当 } t < t_0 +, s < 0 \text{ 或 } t > t_0 +, s > 0 \end{cases} \quad (6)$$

图1是一个二阶VSC系统 u = Hys(s)时的相图^[4],可以看到系统中存在的滑动模态所趋向的稳态已不再是原点,而是一个自振,即抖振。

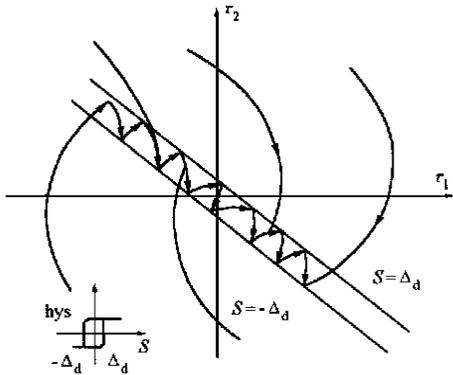


图1 二阶线性VSC系统取 u = Hys(s)情况示意图

2.2 固定空间滞后引起抖振

在某些装置中,其元件本身的静态特征就具有空间滞后 u = KHys(s),此时是结构性的,一旦元件完成后,就不可更改。

2.3 离散系统中采样引起抖振

在用计算机实现控制,以及其他离散化手段进行控制时,运动到达切换面一般不可能正好是一个采样周期的开始,这里的滑动模态是一种“准滑模”,它的切换动作并不是正好发生在切换面上,而是在以原点为顶点的一个锥形体表面上。因此,必然有衰减的抖振,此外,采样周期实质上也是一种时间滞后,同样能造成抖振。

3 削弱抖振的措施

抖振发生的本质原因是由于开关的切换动作造成控制的不连续性,因此,对一个现实的滑模VSC系统,抖振必定存在。我们可以努力去削弱抖振的幅度,使它减少到工程允许的范围内,而无法完全消除它,消除了抖振,也就消除了滑模VSC的抗干扰能力,由于抖振问题是VSC的突出障碍,许多学者提出了减抖措施,其中有代表性的有:

3.1 柔化 sign(s) 函数法^[4]

对于标量控制,将 $u = - \text{sign}(s) = - \frac{s}{|s|} \quad (7)$

代之以光滑函数 $u = - \frac{s}{|s| + \epsilon} > 0$, 为小正数 (8)

近似为 $u = -s$ (9)

这种控制有很高的增益,对于抑制抖振有利,但实现存在困难。

3.2 边界层法

目前,一些研究以饱和特性代替理想继电特性,即引入 sat(s) 代替 sign(s), $u = u(X) + u(X) \text{sat}(s)$ (10)

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} +1 & \text{当 } s > \Delta \\ ks & \text{当 } |s| \leq \Delta \\ -1 & \text{当 } s < -\Delta \end{cases} \quad (11)$$

这种方法的目的是缓解结构切换的不连续性,结果也在切换面附近产生一个高增益,同时也伴随滞后,因此抖振依然存在。

3.3 趋近律法

从物理意义上理解,产生抖振的原因是由于系统运动点以其固有惯性冲向切换面时具有有限大的速度,因此,可为控制该速度设计各种趋近律。目前较为有效的策略是采用指数趋近律^[1]:

$$\dot{s} = - \text{sign}(s) - ks \quad (12)$$

参数 k 表示切换速度。如果取 k 足够小, k 值相当大,则可保证趋近速度在远离切换面时大而在切换面附近减小惯性作用,从而减弱抖动又可快速趋近。

但由规定趋近律解出的变结构控制 u(X) 是状态量的确定函数,而且与系统参数及扰动有关,因此,严格说,规定趋近律对于具有不可测知的持续扰动及可变参数的系统是无意义的。

4 基于模糊控制的减抖方法

在实际工程中,来自专家的语言信息也是对被控对象及干扰的正确反映,正确利用这些信息能够提高系统的性能指标,但现有的变结构控制器却无法合理利用这些语言信息,这是当前VSC的一个缺陷。模糊控制已经被证明为可以有效地利用语言信息的重要工具。在一些复杂系统,特别是系统存在定性的,不精确和不确定信息的情况下,模糊控制的优势更加明显突出。

如图2所示模糊控制是根据系统状态偏离切换面的程度(s)和其变化速度(ṡ)作为反馈量,输入到模糊控制器中,历经下列三个步骤,来确定对控制作用的调整。



图2 模糊控制器的结构示意图

(1) 精确量的模糊化

经过实际采样后控制器的输入量为:

$$E = GE \times s(kT) \tag{13}$$

$$EC = GC \times [s(kT) - s(kT - T)] / T$$

GE、GC 为量化因子 (14)

将 E、EC 及输出量 dU 的模糊集的论域均取为 [-6, +6], 并在论域 [-6, +6] 上均定义七个模糊子集 [PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB], 由此可根据经验及控制性能要求来确定隶属度函数, 这样就将 E、EC 转化为易于控制器处理的模糊量。

(2) 模糊推理

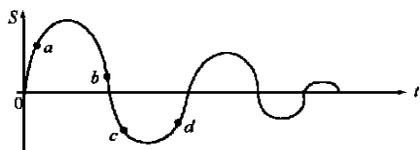


图3 系统运动状态示意图

调整策略如图3所示:当系统状态运动到 a 点,此时 $s > 0$ 且 $\dot{s} > 0$,为了抑制状态量离开切换点 ($s = 0$) 更远,加快状态量向切换面的趋近速度,提高系统的鲁棒性和动态品质,应取控制作用 $u < 0$ 且 $|u|$ 较大;当系统状态运动到 b 点,此时 $s > 0$ 且 $\dot{s} < 0$,为了尽快消除误差,同时减小系统状态到达切换面的冲击,抑制抖振,应取控制作用 $u < 0$ 且 $|u|$ 较小;当系统状态运动到 c 点,此时 $s < 0$ 且 $\dot{s} < 0$,应取控制作用 $u > 0$ 且 $|u|$ 较大,保证能达性条件成立和到达切换面的时间;当系统状态运动到 d 点,此时 $s < 0$ 且 $\dot{s} > 0$,应取控制作用 $u > 0$ 且 $|u|$ 较小,加快趋近速度,抑制抖振,从而保证系统稳定性。

由此,可得到 49 条模糊控制规则:

- IF E = PB AND EC = PB THEN dU = NB
- IF E = PB AND EC = NM THEN dU = NS
- IF E = NM AND EC = NB THEN dU = PB

... ..

The research on chattering problem in variable structure control theory

YAN Qiao, SUN Ying, LI Ke-jun

(Institute of Electricity Engineering, Shandong University of Technology, Jinan 250061, China)

Abstract: The basic theories of variable structure control are introduced systematically in this paper. It includes the reasons of causing chattering which exists in the variable structure control system, and several representative approaches of chattering reduction. Finally, an approach of chattering reduction based on fuzzy logic is presented.

Key words: variable structure control; chattering; fuzzy control

IF E = NM AND EC = PS THEN dU = PS

(3) 解模糊 由于 dU 也是一个模糊量,不能直接作为控制输出,可以采用加权平均判决法转化为精确量:

$$dU = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i) d u_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad \mu \text{ 为隶属度} \tag{15}$$

最终可得模糊变结构控制律^[2]为:

$$u(kT) = u(kT - T) + GU \times dU \quad GU \text{ 为比例因子} \tag{16}$$

5 结论

本文提出了一种基于模糊控制的减振方法,这种模糊控制器实现容易,它用较平滑的智能控制取代跳变控制,避免了切换执行机构的滞后,使变结构控制器具有很好的实际应用价值,有效地解决抖振问题与系统鲁棒性之间的矛盾。如果从这个角度合理利用模糊控制理论来解决抖振问题,那么 VSC 理论在电力系统中必将有更加广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法. 科学出版社, 1996.
- [2] 高峰. 模糊理论及其在电力系统控制中的应用研究. 重庆大学博士论文, 1996.
- [3] 赵振宇,等. 模糊理论和神经网络的基础与应用. 清华大学出版社, 1996.
- [4] 史维祥,等. 近代机电控制工程. 机械工业出版社, 1998.
- [5] 李可军,孙莹. 非线性变结构控制理论及其在电力系统中的应用研究. 山东建材学院学报, 1999, 13 (3): 215-217.
- [6] 李涛. 变结构控制系统中抖振问题的研究. 哈尔滨工业大学硕士论文, 1998.
- [7] 王丰尧. 滑模变结构控制. 机械工业出版社, 1995.

收稿日期: 2000-10-12;

作者简介: 阎俏(1976 -),女,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制; 孙莹(1959 -),男,教授,硕士生导师,从事电力系统继电保护与自动化的教学与研究工作。