

# 基于一种快速幂次滑模趋近律的电力系统混沌控制

路尧

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 存在于电力系统中的混沌振荡如若不及时加以控制,将会造成停电事故等危害。为分析一个二阶电力系统的混沌振荡动力学行为,采用李雅普诺夫指数图的方法,并有针对性地对指数趋近律、比例积分控制等传统滑模趋近律所暴露的抖振现象、收敛速度慢以及动态响应不平滑等问题加以改进,进而提出一种快速幂次滑模趋近律。仿真实验结果表明,此方法可大幅度改善系统动态过程并有效消除抖振,且具有优越鲁棒性。

**关键词:** 电力系统混沌振荡; 指数趋近律; 比例积分控制; 快速幂次滑模趋近律

**Abstract:** If the chaos oscillation in power system cannot be controlled in time, it will cause power outages and other hazards. In order to analyze the dynamic behavior of chaotic oscillation of a two order power system, the method of Lyapunov exponent chart is adopted. The problems about the chattering phenomenon, slow convergence speed and non-smooth dynamic response exposed by the traditional sliding mode reaching laws such as the exponential reaching law and the proportional integral control are improved, and then a fast power sliding mode reaching law is proposed. The simulation results show that the proposed method can greatly improve the dynamic process of the system and eliminate the chattering effectively, and it has excellent robustness.

**Key words:** chaos oscillation in power system; exponential reaching law; proportional plus integral control; fast power sliding mode reaching law

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)02-0062-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.02.014

## 0 引言

随着电力系统规模的不断发展和增大,外界扰动引起的电压失稳常导致混沌振荡的产生。而对于电力系统这样一个强耦合、非线性的动态系统,其动力学行为<sup>[1]</sup>受其自身参数的影响。外界扰动幅值达到一定条件将会使系统出现混沌振荡<sup>[2-6]</sup>,系统会出现解列,进而出现停电事故。近些年发生在一些国家的大停电事故就是由混沌振荡导致的。

因此,国内外学者纷纷对混沌振荡产生机理进行探究分析。文献[7]将不同失稳模式下的电力系统与混沌振荡的关系进行了阐述。文献[8]研究了电力系统混沌动力学行为在负荷扰动和有界噪声下的轨迹。文献[9]将电压失稳与混沌分叉之间的关系进行了详述。文献[10]利用 Melnikov 方法和椭圆积分法研究了二阶电力系统混沌振荡的条件。

目前用于电力系统混沌控制的方法有很多种,

如比例积分控制、滑模控制<sup>[11]</sup>等。滑模控制因其在控制过程中强大的对外扰动鲁棒性而被广泛应用,但随之而来的抖振问题却对系统控制的精确性和耗能产生严重影响,更有甚者引发系统失稳。因此,如何使系统在最快趋近于稳定状态的过程中消除抖振成为研究重点。针对控制抖振方面的问题,国内外学者有很多研究。由于常规 PI 控制存在比例、积分系数难整定,动态响应速度慢,易产生超调,并且纯积分环节难以无差地跟踪正弦形式的混沌振荡信号等一系列缺点。

下面分析了二阶电力系统模型的动力学行为,并在指数趋近律的滑模控制基础上提出了一种快速幂次的滑模趋近律。在保证系统以更快速度趋近滑模面的同时,针对趋近律的鲁棒项进行了改进,缩短了系统逼近滑模面所用的时间,有效抑制了抖振。数字仿真实验表明,所提出的快速幂次滑模控制方法优于常规 PI 控制和指数趋近律的滑模控制,验证了该方法对平息电力系统混沌振荡的可行性和有效性。

# 1 电力系统模型及其动力学分析

## 1.1 数学模型

采用同步电动机的二阶电力系统简化模型,该模型方程如下:

$$\begin{cases} \frac{d\delta(t)}{dt} = \omega(t) \\ H \frac{d\omega(t)}{dt} = -P_{\max} \sin\delta(t) - D\omega(t) + P_m + P_{\xi} \cos\beta t \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\delta$ 、 $\omega$  为两台电机之间的相对电角度和相对转速,即  $\delta = \delta_1 - \delta_2$ ,  $\omega = \omega_1 - \omega_2$ ;  $P_{\max}$  为电机的电磁功率;  $P_m$  为电机的输入机械功率;  $P_{\xi}$  和  $\beta$  分别为系统扰动负荷幅值和频率;  $D$ 、 $H$  为阻尼系数和等值时间惯性常数。

## 1.2 混沌振荡现象的产生<sup>[12]</sup>

为便于研究,将式(1)中第二式参数分别除以

$$H, \text{ 并取 } a = \frac{P_{\max}}{H} = 1, b = \frac{D}{H} = 0.02, c = \frac{P_m}{H} = 0.2, F =$$

$$\frac{P_{\xi}}{H} = 0.2593, \beta = 1, H = 100, \text{ 则可得简化公式为}$$

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega \\ \dot{\omega} = -\sin\delta - 0.02\omega + 0.2 + 0.2593\cos t \end{cases} \quad (2)$$

同时取初值  $(\delta_0, \omega_0) = (0.43, 0.003)$ , 并在此条件下观察系统的动力学行为,如图1所示。系统相图上的功角和频率的关联关系验证了混沌振荡的产生。

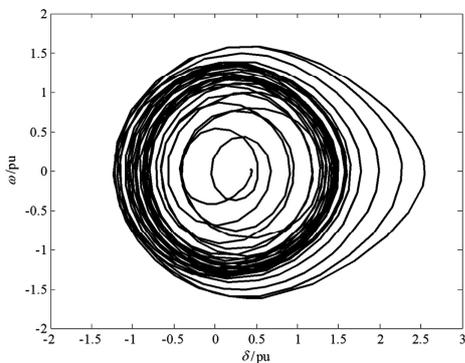


图1 系统发生混沌振荡的平面相图

周期性的负荷扰动达到一定数值将会引起系统产生混沌振荡现象。因此,在以上给定初值条件下计算系统于负荷扰动变化时的李雅普诺夫指数,并绘制指数图,如图2所示。

由图2可知,系统有两个李雅普诺夫指数,且最大值为正值,证明其已经处于混沌振荡状态。同时,

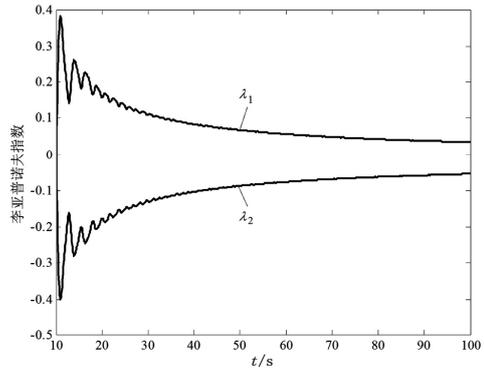


图2 系统李雅普诺夫指数变化曲线

亦可从系统的时域图(图3)上观察到,当混沌振荡发生时,系统功角和角速度分别都处于非周期、无规则的振动。此状态将会对电力系统稳定性产生严重影响,甚至可能引发大规模停电。

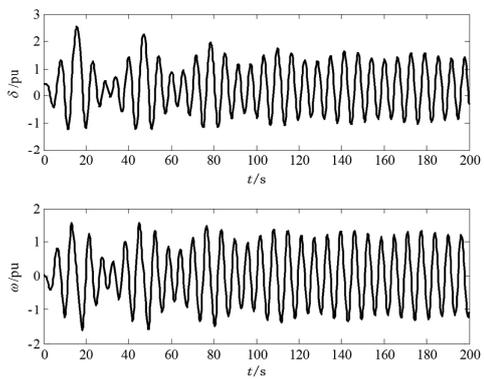


图3 系统混沌振荡状态时功角和角速度时域曲线图

# 2 基于一种快速幂次趋近律的滑模控制器设计

## 2.1 常规滑模控制基本原理

滑模控制即滑模变结构控制,其根据系统特定要求的动态特性设计滑模面,并依据特定的控制律迫使系统状态沿特定路径运动收敛到该切换平面,进而在此平面上运动至控制目标。由于传统滑模变结构控制存在严重抖振问题,使得系统状态在进入滑模面时产生高频抖动,表现形式为在切换平面附近上下穿越,故而增加能耗,降低精确性。为削弱抖振,加快趋近速度,在原有指数趋近律的基础上设计了一种基于快速幂次趋近律的滑模控制,使得系统状态在快速收敛接近滑模面的同时能够平滑运动至控制目标。

## 2.2 快速幂次滑模趋近律

为达到消除系统抖振的目的,高为炳教授提出

了等速趋近律、指数趋近律等比较实用的趋近律,通过改变适当参数来优化系统趋近过程的运动轨迹,进而使滑动模态得以较好实现。相较而言,等速趋近律存在趋近速度慢的问题,而指数趋近律虽然在远离滑模面的趋近阶段速度较快,但因含有常数项,故而在靠近滑模面时易产生较大抖振。因此,为了保持系统在趋近滑模面运动过程的高速率以及靠近并进入滑模状态时的平滑性,下面提出一种快速幂次滑模趋近律。

分别给出指数趋近律和快速幂次趋近律的表达式如下:

$$\dot{s} = -ks - \varepsilon \operatorname{sgn}(s) \quad s(0) = s_0 \quad (3)$$

$$\dot{s} = -k_1 s - k_2 |s|^a \operatorname{sgn}(s) \quad s(0) = s_0 \quad (4)$$

不难看出,式(3)的指数项将保证系统状态能够快速收敛并接近滑模面,但式中第二项却会使其在进入滑模面时产生上下穿越滑模的效果,故而产生明显抖振。其中  $k > 0$   $k_1 > 0$   $k_2 > 0$   $\varepsilon > 0$   $\rho < a < 1$ 。由式(4)知,当系统状态向滑动模态趋近时,指数项能够保证其趋近速度;而这也同时弥补了幂次项在滑模趋近阶段速度不足的问题,进而于此前提下发挥幂次项在接近滑模面时能放缓收敛速度并平滑进入滑模阶段,相比于指数趋近律,有效地消除了系统抖振。

### 2.3 控制器设计

对比于式(2),处于混沌振荡状态下的系统方程需在式(2)中加入控制量  $u$ ,且令控制目标为发电机功角,即为状态变量  $x_1 = \delta$ 。故受控系统可写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\sin x_1 - 0.02x_2 + 0.2 + 0.2593 \cos t + u \end{cases} \quad (5)$$

取受控系统式(5)跟踪目标  $r(t) = 0$ ,则系统状态变量引起的误差向量为

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - r \\ e_2 = x_2 - \dot{r} \end{cases} \quad (6)$$

其中  $\dot{e}_1 = e_2$   $\dot{x}_1 = x_2$ ,式(6)又可简化为

$$\begin{cases} e_1 = x_1 \\ e_2 = x_2 \end{cases} \quad (7)$$

故而式(5)可记为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = -\sin e_1 - 0.02e_2 + 0.2 + 0.2593 \cos t + u \end{cases} \quad (8)$$

常规滑动模态即滑模面可设为  $s = ce_1 + e_2$ ,则其导数形式为

$$\begin{aligned} \dot{s} = \dot{c}e_1 + \dot{e}_2 = ce_2 - \sin e_1 - 0.02e_2 + 0.2 + \\ 0.2593 \cos t + u \end{aligned} \quad (9)$$

由所采用指数趋近律

$$\dot{s} = -ks - \varepsilon \operatorname{sgn}(s) \quad (10)$$

可以得到相应的控制律为

$$\begin{aligned} u = -ce_2 + \sin e_1 + 0.02e_2 - 0.2 - 0.2593 \cos t - \\ ks - \varepsilon \operatorname{sgn}(s) \end{aligned} \quad (11)$$

若采用所提及的快速幂次趋近律

$$\dot{s} = -k_1 s + k_2 |s|^a \operatorname{sgn}(s) \quad (12)$$

则可知控制律为

$$\begin{aligned} u = -ce_2 + \sin e_1 + 0.02e_2 - 0.2 - 0.2593 \cos t - \\ k_1 s - k_2 |s|^a \operatorname{sgn}(s) \end{aligned} \quad (13)$$

为突出以上两种趋近律的优越性,此处引入传统PI控制进行参考比较,其控制律即  $u = k_p(x_1 - r) + k_i \int (x_1 - r) dt$ ,则其化为

$$u = k_p x_1 + k_i \int x_1 dt \quad (14)$$

控制律的选择直接关系到控制器的优劣,所以除了选取PI控制作为基准对照,还分别采用指数趋近律和快速幂次趋近律的滑模趋近过程对比图,来验证其各自趋近阶段的收敛快慢以及动态品质特点。

## 3 算例仿真

分别采用基于指数趋近律、快速幂次趋近律的滑模控制来对电力系统混沌振荡进行平抑。设系统参数为  $a = 1$ ,  $b = 0.02$ ,  $c = 0.2$ ,  $F = 0.2593$ ,  $H = 100$ ; PI控制器参数为  $k_p = 50$ ,  $k_i = 0.1$ ; 指数趋近律控制器的参数为  $k = 5 \times 10^3$ ,  $\varepsilon = 5$ ; 快速趋近律的控制器参数为  $k_1 = 5 \times 10^3$ ,  $k_2 = 5$ ,  $\rho = 150$ 。

系统初值为  $(\delta_0, \omega_0) = (0.43, 0.003)$ , Simulink仿真100s,得出3种不同控制条件下的功角误差控制曲线,如图4所示。处于混沌振荡状态下的电力系统功角误差在基于两种趋近律控制器作用下,呈明显收敛趋势,并逐渐恢复至系统同步。而PI控制下的功角跟踪误差却表现出幅值围绕零点做随时间缓慢减小的振荡运动。相比之下,前两种控制方案能使系统误差在有限时间内快速平滑收敛至0,并削弱了抖振,从而减少了控制输入能量。

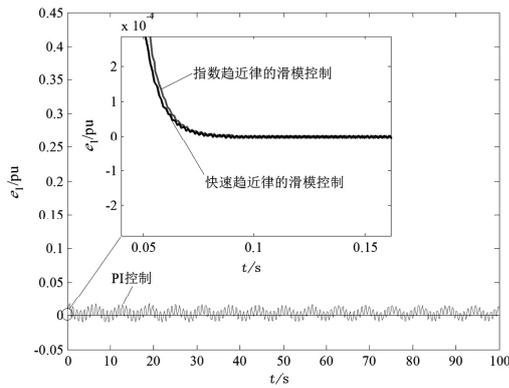


图4 电力系统功角时间变化图

综合前两种控制策略的比较,所提出的基于快速幂次趋近律的滑模控制在远离滑模面时与基于指数趋近律控制方案的趋近速度相近,但在接近滑模面时却表现出慢速平滑的特性,这是由于趋近律用幂次项函数代替了符号函数。故相较于后者,能有效消除其因进入滑模面时速度过快引起的系统抖振现象,并减小其控制输入振幅,从而达到减小控制输入能量的目的,表现出了3种方案之中的最优控制性能。

## 4 结 语

运用李雅普诺夫指数图对一个二阶电力系统混沌振荡动力学行为进行详细分析;并针对指数趋近律、PI控制律所暴露出的抖振现象、收敛速度慢、动态响应不平滑等问题,提出了一种基于快速幂次趋近律的滑模控制方案来有效平抑系统振荡至恢复同步,得到了显著的收效。仿真结果表明,基于此趋近律的控制策略对系统状态在远离滑模面时能保证其快速收敛,而在接近滑模面时能使系统状态慢速平滑地进入,显著地改善了系统在控制阶段的运动品质;并有效地削弱了抖振,减小了控制能量,显示了其优质鲁棒性,在未来控制发展领域将会有不错的应用。

### 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] Huerta H, Loukianov A G, Canedo J M. Robust Multi-machine Power Systems Control via High Order Sliding Modes[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7): 1602-1609.

[3] AE Aroudi, R Giral, J Calvente, et al. Synthesis of Loss-free Resistors Based on Sliding-mode Control and Its Applications in Power Processing[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(5): 689-699.

[4] 袁雷,沈建清,肖飞,等. 插入式永磁低速同步电机非奇异终端滑模观测器设计[J]. 物理学报, 2013, 62(3): 1-9.

[5] 朱方,赵红光,刘增煌,等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 1-7.

[6] 杨国良,李惠光. 直驱式永磁同步风力发电机中混沌运动的滑模变结构控制[J]. 物理学报, 2009, 58(11): 7552-7557.

[7] Yu Y X, Jia H J, Li P, et al. Power Systems Instability and Chaos[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 65(3): 187-195.

[8] Wei D Q, Luo X S, Qin Y H. Studying Chaos in Power System under Load Perturbation and Bounded Noise[C]// 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, Wuhan: IEEE Conference Publications, 2010: 2185-2188.

[9] 薛禹胜,周海强,顾晓荣,等. 电力系统分岔与混沌研究述评[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(16): 9-15.

[10] Chen X W, Zhang W N, Zhang W D. Chaotic and Subharmonic Oscillations of a Nonlinear Power System[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2005, 52(12): 811-815.

[11] 许燕青,毛家松,刘建峰,等. 基于同步思想的电力系统混沌滑模变结构控制[J]. 电测与仪表, 2012, 49(8): 27-31.

[12] 倪骏康,刘崇新,庞霞,等. 电力系统混沌振荡的等效快速终端模糊滑模控制[J]. 物理学报, 2013, 62(19): 1-7.

### 作者简介:

路尧(1989),硕士研究生,从事电力系统混沌振荡、电力市场方面的研究。

(收稿日期: 2016-12-04)