

电力系统混沌振荡的等效快速终端模糊滑模控制*

倪骏康[†] 刘崇新[‡] 庞霞

(电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

(西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

(2013年5月11日收到; 2013年6月26日收到修改稿)

电力系统混沌振荡被认为是大型互联电力系统停电事故的主要原因, 本文通过相图、李雅普诺夫指数图和时域波形图分析了二阶电力系统混沌振荡的动力学行为, 并提出了等效快速终端模糊滑模控制来抑制电力系统混沌振荡, 使其恢复到同步运行状态. 仿真结果表明, 所提出的控制方案不仅具有较快的收敛速度, 而且能够柔化控制信号, 减少控制能量, 并且能有效地降低抖振.

关键词: 电力系统混沌振荡, 等效滑模控制, 模糊滑模控制, 快速终端滑模控制

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Ac, 05.45.Xt, 84.70.+p

DOI: 10.7498/aps.62.190507

1 引言

电力系统是一种典型的强耦合、高度非线性、多变量的动态系统, 具有丰富的非线性动力学行为. 电力系统发展的必然趋势是大电网互联, 大电网的互联为电能的生产和消费带来了巨大便利, 同时也为系统带来了稳定性问题. 近些年来, 美国^[1]、中国^[2]、巴西^[3]和欧洲^[4]一些国家的互联电力系统发生大停电事故, 给国民经济造成巨大损失. 事故分析表明在这些电力系统中曾经发生过无规则的、突发性或阵发性的机电振荡——混沌振荡, 而且通过传统的线性控制器 (PSS, LOEC 等) 难以控制或者抑制这种振荡. 因此分析电力系统混沌振荡产生的机理以及研究控制混沌振荡的方法就显得非常必要.

当周期性负荷扰动达到一定幅值时, 电力系统就会出现混沌振荡现象. 电力系统混沌振荡被认为是电压崩溃、角度失稳的元凶^[5,6]. 近些年来, 人们对混沌振荡的机理进行了深入的研究. Jia 等^[7]研究了电力系统环面分岔、环面折叠分岔和倍周期分岔通向混沌的道路. Yang 等^[8]运用拓扑马蹄

理论, 通过计算机计算拓扑熵证明了简单电力系统混沌的存在性. Yu 等^[9]研究了混沌振荡与电力系统不同失稳模式的关系. Wei 等^[10]研究了在负荷扰动和有界噪声下电力系统混沌动力学行为. Qin 等^[11]的研究表明电力系统在随机相位扰动下会发生混沌振荡现象. Jia 等^[12]研究了电力系统小信号稳定域与混沌之间的关系, 并得出了在研究小信号稳定域及边界问题时不必考虑混沌振荡这一结论. Chiang 等^[13]通过计算机仿真观察到电力系统在负荷大范围波动下的混沌行为, 并通过宽带频谱和 Lyapunov 指数证明了奇怪吸引子的存在. 王宝华等^[14]总结了电力系统混沌振荡的机理以及抑制混沌振荡的方法. Chen 等^[15]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.

许多先进的控制方法被应用于电力系统混沌振荡的控制中, 典型的控制方法有自适应补偿控制^[16]、逆系统控制^[17]、最小二乘支持向量机控制^[18]、无源控制^[19]、ANFIS-based 控制^[20]、鲁棒控制^[21]、自适应 Backstepping 控制^[22]、延时反馈控制^[23]、反馈精确线性化控制^[24]、基于有限时稳定原理控制^[25]和滑模控制^[26]等. 特别是滑模控

* 国家自然科学基金 (批准号: 51177117)、国家自然科学基金创新研究群体科学基金 (批准号: 51221005) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 2010020110023) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: max12391@126.com

[‡] 通讯作者. E-mail: liucx@mail.xjtu.edu.cn

制具有快速响应, 优良的暂态特性以及对参数变化和外部扰动的鲁棒性等优点, 被广泛应用于电力系统控制中. 然而, 抖振问题一直阻碍着滑模控制的发展, 人们一直探寻着降低抖振的方法, 切换函数连续化 [27]、模糊滑模控制 [28]、神经网络滑模控制 [29] 和终端滑模控制 [30] 等方法被证明能有效地降低抖振.

本文分析了二阶电力系统混沌振荡动力学行为, 提出了等效快速终端模糊滑模控制来抑制电力系统混沌振荡. 该控制方案充分利用了模糊控制对控制信号的柔化作用与快速终端滑模控制的快速收敛性, 具有收敛速度快, 控制抖振小, 控制精度高, 控制信号平滑, 控制能量小, 模糊规则数量少等优点. 通过数值仿真, 证实了该方案的优越性.

2 电力系统模型及动力学分析

本文采用二阶电力系统模型, 该模型也被称为摇摆方程

$$\begin{aligned} \frac{d\delta}{dt} &= \omega, \\ \frac{d\omega}{dt} &= -\frac{1}{H}P_s \sin \delta - \frac{D}{H}\omega \\ &\quad + \frac{1}{H}P_m + \frac{1}{H}P_c \cos t, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 δ 和 ω 分别表示两台发电机之间的相对电角度和发电机 q 轴的角速度与同步电角速度的差值; H 为系统的转动惯量; P_s 为发电机电磁功率; P_m 为发电机的机械功率; D 为阻尼系数; $P_c \cos t$ 为扰动项.

为了分析二阶电力系统模型的动力学行为, 可将模型 (1) 简化为

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= -a \sin \delta - b\omega + c + F \cos t, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $a = \frac{1}{H}P_s, b = \frac{D}{H}, c = \frac{P_m}{H}, F = \frac{P_c}{H}$. 研究在参数取为 $a = 1, b = 0.02, c = 0.2, F = 0.2593, H = 100$, 并取初值为 $(\delta_0, \omega_0) = (0.43, 0.003)$ 的情况下电力系统混沌振荡动力学行为. 图 1 描述了电力系统功角和频率在相图上的表现, 从图中可以看出电力系统处于混沌振荡状态.

电力系统中阻尼系数和发电机的惯性系数往往是常数 [31], 而负荷扰动的变化通常能引起电力系统混沌振荡. 从负荷扰动幅值 P_c 变化的李雅普

诺夫指数图 (图 2) 上, 我们可以计算出当参数取为 $a = 1, b = 0.02, c = 0.2, F = 0.2593$ 时的李雅普诺夫指数 $LE_1 = 0.0174, LE_2 = 0, LE_3 = -0.0374$, 其最大李雅普诺夫指数为正数. 计算李雅普诺夫维数为 $D_L = 2 + \frac{0.0174 + 0}{|-0.0374|} = 2.4652$, 可见系统 (2) 是一个分数维系统, 这说明电力系统在该组参数条件下处于混沌振荡状态.

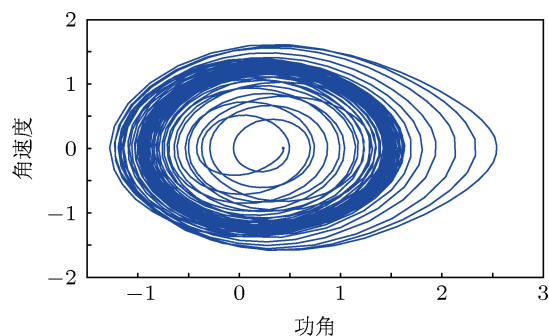


图 1 电力系统混沌振荡平面相图

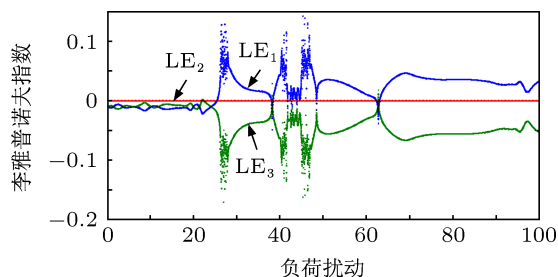


图 2 负荷扰动变化的李雅普诺夫指数图

从二阶电力系统时域波形图 (图 3) 上我们可以清楚地看到, 电力系统的功角处于一种无规则的, 非周期的混沌振荡状态. 这种混沌振荡状态对电力系统具有极大的危害, 它可以使互联电力系统失去稳定性, 严重时会导致互联系统解列, 引发大面积停电事故. 因此, 有必要研究控制电力系统混沌振荡的方法.

3 等效快速终端模糊滑模控制器设计

受控二阶电力系统可以写为

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= -\sin \delta - 0.02\omega + 0.2 + 0.2593 \cos t + u. \end{aligned} \quad (3)$$

控制目标是使 $\delta_d = 0, \omega_d = 0$ 即系统中发电机保持同步. 定义误差函数 $e_1 = \delta - \delta_d, e_2 = \omega - \omega_d$, 则受控系统可以写为

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2, \\ \dot{e}_2 &= -\sin e_1 - 0.02e_2 + 0.2 + 0.2593 \cos t + u. \end{aligned} \quad (4)$$

滑模控制是通过选择切换平面, 控制系统状态在有限时间内到达该切换平面, 并沿着切换平面到达控制目标的一种控制方法. 然而, 由于实际系统中存在测量误差、时间空间滞后开关、系统惯性、系统延时等因素, 导致滑模运动无法准确地发生在滑模面上, 而是在滑模面附近来回穿越, 形成高频抖振. 本文提出了等效快速终端模糊滑模控制方案, 利用模糊控制理论, 并用连续控制量代替切换控制量, 从而抑制抖振现象的发生.

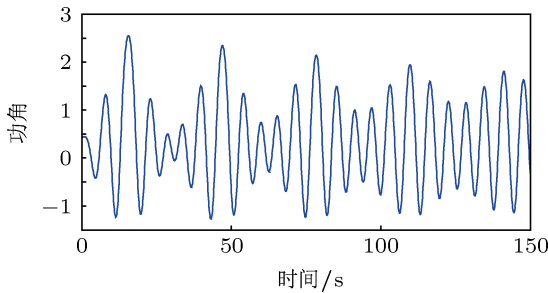


图3 电力系统混沌振荡时域波形图

等效快速终端模糊滑模控制器的设计可以分为以下几个步骤: 首先, 设计快速终端滑模控制器, 保证系统能够快速收敛到稳定状态; 其次, 将滑模控制器分为等效控制和切换控制两个部分; 最后, 通过设计模糊控制器, 根据系统状态距离平衡态的远近自适应调节等效控制和切换控制的比例, 从而达到柔化控制信号, 消除抖振的目的.

3.1 快速终端滑模控制器设计

终端滑模控制采用非线性切换面, 与传统滑模控制的线性切换面相比, 可以保证系统在有限时间内趋近于零点并且具有更高的控制精度. 传统的终端滑模控制的形式为

$$s = \dot{e}_1 + \beta e_1^{q/p} = 0, \quad (5)$$

其中 $\beta > 0$, $p, q (p > q)$ 为正奇数.

然而, 在系统状态接近于平衡态时, 非线性切换面的收敛速度要慢于线性切换面的收敛速度, 因此在收敛时间上传统 Terminal 滑模控制并不是最优的. 通过引入线性切换面^[32], 设计全局快速终端滑模控制, 可以达到收敛时间上的最优. 快速滑动模态的形式如下:

$$s = \dot{e}_1 + \alpha e_1 + \beta e_1^{q/p} = 0. \quad (6)$$

其中 $e_1 \in R$ 为状态变量, $\alpha, \beta > 0$, $p, q (p > q)$ 为正奇数.

通过求解 Bernoulli 方程 (6) 可以得到在滑动模态上从任意初始状态 $e_1(0) \neq 0$ 沿滑动模态到达平衡状态 $e_1 = 0$ 的时间为

$$t = \frac{p}{\alpha(p-q)} \ln \frac{\alpha e_1(0)^{(p-q)/p} + \beta}{\beta}. \quad (7)$$

通过选取恰当的参数 α, β, p, q 可使系统在有限时间内到达平衡状态. 由 (6) 式可得

$$\dot{e}_1 = -\alpha e_1 - \beta e_1^{q/p}. \quad (8)$$

该式表明, 当系统状态远离平衡状态时, 系统向控制目标收敛的速率主要取决于非线性项 $\dot{e}_1 = -\beta e_1^{q/p}$; 当系统接近平衡状态时, 系统向控制目标的收敛速度主要取决于 $\dot{e}_1 = -\alpha e_1$ 这一线性项^[33].

3.2 基于等效控制的快速终端滑模控制器设计

滑模控制器中, 控制律通常由等效控制 u_{eq} 和切换控制 u_{sw} 组成. 等效控制将系统状态保持在滑模面上, 切换控制迫使系统状态在滑模面上运动, 对于受控电力系统 (4), 其等效控制可以设计为

$$u_{eq} = \sin e_1 + 0.02e_2 - 0.2 - 0.2593 \cos t - \beta \frac{q}{p} s_0^{(q-p)/p} \dot{s}_0. \quad (9)$$

为了使系统能在有限时间内到达滑模面, 切换控制设计为

$$u_{sw} = -\alpha \dot{s}_0 - \varphi s_1 - \gamma s_1^{q_0/p_0}, \quad (10)$$

其中快速滑动模态表示为

$$s_0 = e_1, \quad (11)$$

$$s_1 = \dot{s}_0 + \alpha s_0 + \beta s_0^{q/p}. \quad (12)$$

3.3 基于等效控制的快速终端模糊滑模控制器设计

全局快速终端滑模控制虽然能使系统快速收敛到平衡状态, 但其还是存在一些不足之处, 例如它并没有很好地消除抖振. 本文提出的基于等效控制的快速终端模糊滑模控制既保留了快速终端滑模控制快速收敛特性, 又通过模糊控制柔化控制信号, 减轻或避免抖振.

模糊滑模控制器的设计分为三个步骤: 模糊化, 模糊推理和反模糊化.

模糊化 通过定义模糊集和隶属度函数将实际系统的输入输出值转化为模糊值. 将模糊滑模控制器的输入和输出变量简单地分为三类: 正数、零和负数, 并定义模糊集为: $N =$ 负数; $P =$ 正数; $Z =$ 零. 设计 N, P 为梯形隶属度函数, Z 为三角形隶属度函数, 则模糊系统的输入输出函数形式如图 4 和图 5 所示.

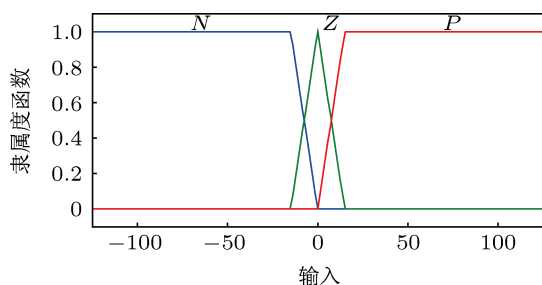


图 4 模糊输入隶属函数图

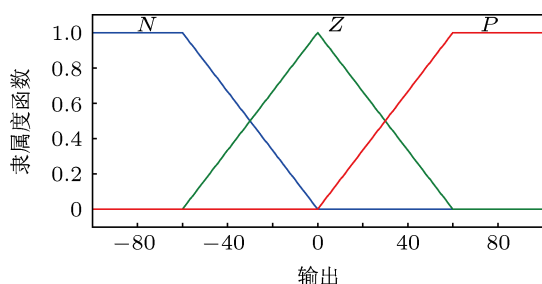


图 5 模糊输出隶属函数图

模糊推理 通过语言来定性说明一系列规则如何对系统进行控制. 根据滑模控制原理, 将模糊规则设计为

If($e_1(t)$ is N) then (μ is P);

If($e_1(t)$ is Z) then (μ is Z);

If($e_1(t)$ is P) then (μ is P).

反模糊化 该模块将模糊指令变成执行器的实际输出指令. 采用重心法进行反模糊化, 得到控制器输出

$$u = \frac{\mu_{ZO}(s)u_{eq} + \mu_{NZ}(s)(u_{eq} + u_{sw})}{\mu_{ZO}(s) + \mu_{NZ}(s)} = u_{eq} + \mu_{NZ}(s)u_{sw}, \quad (13)$$

$$\mu_{ZO}(s) + \mu_{NZ}(s) = 1. \quad (14)$$

可以看出, 当 $\mu_{NZ}(s) = 1$ 时, 控制律退化为传统滑模控制. 当 $\mu_{NZ}(s) \neq 1$ 时, 通过隶属度函数 $\mu_{NZ}(s)$ 的变化实现抖振的消除.

通过模糊变换, 快速滑动模态 (12) 式可写为

$$s_1 = \dot{s}_0 + \mu\alpha s_0 + \beta s_0^{q/p}. \quad (15)$$

3.4 稳定性分析

定义李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2}s_1^2, \quad (16)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s_1 \dot{s}_1 = s_1(\dot{s}_0 + \mu\alpha \dot{s}_0 + \beta \frac{q}{p} s_0^{(q-p)/p} \dot{s}_0) \\ &= s_1(\dot{e}_2 + \mu\alpha \dot{e}_1 + \beta \frac{q}{p} e_1^{(q-p)/p} \dot{e}_1) \\ &= s_1(-\sin e_1 - 0.02e_2 + 0.2 + 0.2593 \cos t \\ &\quad + u_{eq} + \mu u_{sw} + \mu\alpha \dot{e}_1 + \beta \frac{q}{p} e_1^{(q-p)/p} \dot{e}_1) \\ &= -\mu\phi s_1^2 - \mu\gamma s_1^{(p_0+q_0)/p_0}. \end{aligned} \quad (17)$$

因为 μ, ϕ, γ 均为正数, 而且 $(p_0 + q_0)$ 为偶数, 所以 $\dot{V} \leq 0$, 系统稳定.

4 仿真结果

首先采用基于等效控制的快速终端模糊滑模控制来抑制电力系统混沌振荡, 对于系统 (2) 取参数为 $a = 1, b = 0.02, c = 0.2, F = 0.2593$, 初值为 $(\delta_0, \omega_0) = (0.43, 0.003)$, 控制参数为 $\alpha = 1, \beta = 2, p = 9, q = 5, \phi = 20, \gamma = 15, p_0 = 3, q_0 = 1$. 采用 simulink 仿真 10 s, 功角随时间变化图、控制输入随时间变化图和滑模控制抖振图分别如图 6 至图 8 所示

从图中可以看出, 在控制器的作用下, 混沌振荡的电力系统很快恢复到同步状态, 而且控制输入比较平滑, 幅值较小, 从而减小了控制能量. 从抖振图上可以看出, 该方法有效地抑制了抖振现象的发生.

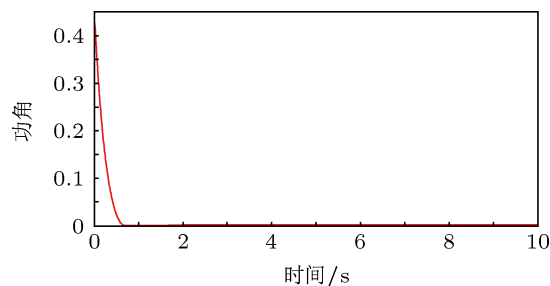


图 6 受控系统功角随时间变化图

为了说明本方案的优越性, 在相同的条件下, 利用全局快速终端滑模控制器仿真 10 s, 功角随时间变化图、控制输入随时间变化图和滑模控制抖振图分别如图 9 至图 11 所示.

从功角随时间变化图中可以看出,当电力系统发生混沌振荡时,对电力系统及时施加全局快速终端滑模控制后,系统功角迅速恢复到同步状态.但是从控制输入随时间变化图中可以看出,控制输入量出现了一定程度的振荡,控制输入不平滑而且幅值较大.从抖振图上可以看出,滑模控制出现了较大的抖振.

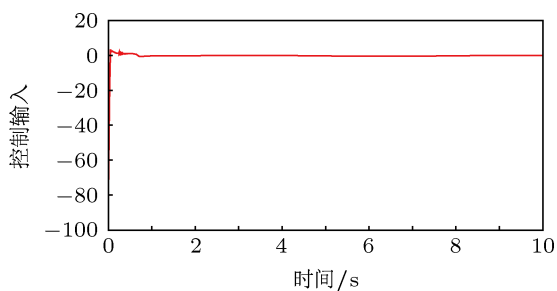


图7 受控系统控制输入随时间变化图

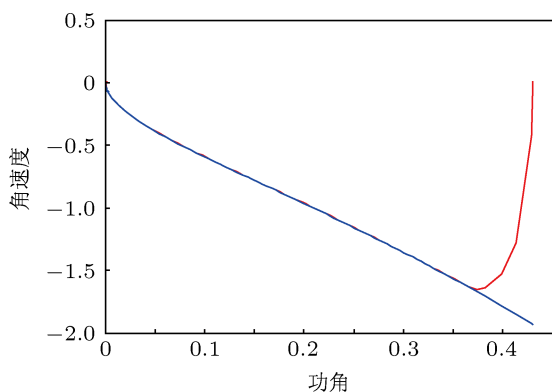


图8 滑模控制抖振图

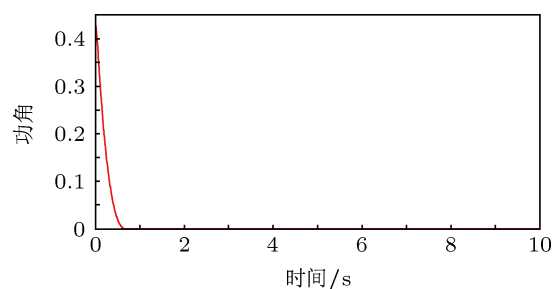


图9 受控系统功角随时间变化图

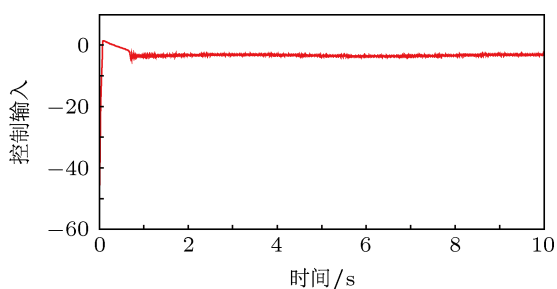


图10 受控系统控制输入随时间变化图

综合比较两种控制方案,虽然两种方案的收敛时间相同,但是本文提出的等效快速终端模糊滑模控制明显比全局快速终端滑模控制输入光滑,控制量幅值小,从而减小了控制能量,这是因为模糊控制对控制信号起到了柔化作用.本文提出的控制方案还能更有效地抑制抖振现象的发生,因为模糊控制能根据系统状态离滑模面的远近,不断调节等效控制和切换控制的比例.

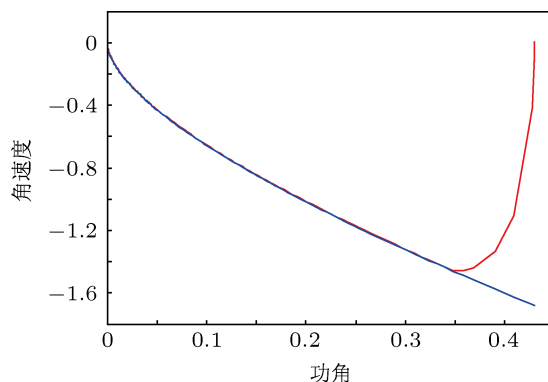


图11 滑模控制抖振图

通过与其他文献提出的二阶电力系统混沌振荡的控制方案比较,本文提出的控制方案更具有优势,与文献 [16] 提出的自适应补偿控制,文献 [17] 提出的逆系统方法控制以及文献 [18] 提出的最小二乘支持向量机控制相比,本文提出的控制方案能使混沌振荡的电力系统更快地恢复到同步运行状态,因而能最大限度地降低混沌振荡对电力系统的影响.与文献 [26] 提出的滑模控制相比,本方案能更有效地抑制抖振,收敛速度也更快;与文献 [34] 提出的模糊滑模控制相比,本方案控制输入更为平滑,幅值更小;与文献 [35] 提出的积分模糊滑模控制相比,本方案控制输入的初始幅值更小.

等效快速终端模糊滑模控制将模糊控制理论、快速终端滑模控制理论同等效控制理论巧妙地结合,充分发挥了模糊控制对控制信号的柔化作用以及快速终端滑模控制的快速收敛性,并通过调节切换控制与等效控制的比例达到抑制抖振的目的.因此,本文提出的控制方案在提高收敛速度、降低控制输入的幅值、平滑控制输入以及抑制抖振方面要优于其他电力系统混沌振荡的控制方案.

5 结论

本文通过平面相图、李雅普诺夫指数图和时序波形图分析了二阶电力系统混沌振荡动力学行为,并提出了等效快速终端模糊滑模控制来使电力

系统恢复同步运行状态. 该控制方案充分利用了模糊控制对控制信号的柔化作用与快速终端滑模控制的快速收敛性, 具有收敛速度快, 控制抖振小, 控制精度高, 控制信号平滑, 控制能量小, 模糊规则数量少等优点. 仿真结果表明, 该控制方案不仅能使

电力系统快速地从混沌振荡状态恢复到同步状态, 而且能够柔化控制信号, 减少控制能量, 并且能有效地降低抖振. 本文提出的控制方案能有效地降低控制量的幅值, 减少了控制能量, 在实际系统的控制中具有广阔的应用前景.

- [1] Xue Y S 2003 *Autom. Electr. Power Syst.* **27** 1 (in Chinese) [薛禹胜 2003 电力系统自动化 **27** 1]
- [2] Zhang W J, Yin Q Y 1997 *Power Syst. Technol.* **21** 54 (in Chinese) [张皖军, 尹其云 1997 电网技术 **21** 54]
- [3] Lin W F, Sun H D, Tang Y, Bo G Q, Yin Y H 2010 *Autom. Electr. Power Syst.* **34** 1 (in Chinese) [林伟芳, 孙华东, 汤涌, 卜广全, 印永华 2010 电力系统自动化 **34** 1]
- [4] Mansour Y 1990 *Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience* (1st edn.) (New York: IEEE Press) p34
- [5] Lal D K, Swarup K S 2011 *Appl. Soft. Comput.* **11** 103
- [6] Jia H J, Yu Y X, Li P, Su J F 2003 *Proc the CSEE* **23** 1 (in Chinese) [贾宏杰, 余贻鑫, 李鹏, 宿吉峰 2003 中国电机工程学报 **23** 1]
- [7] Jia H J, Yu Y X, Zhang P, Yu X D, Huang C H 2004 *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering* Montreal, Canada, May 2—5, 2004 p79
- [8] Yang X S, Li Q D, Cheng S J 2009 *Appl. Math. Comput.* **211** 467
- [9] Yu Y X, Jia H J, Li P, Su J F 2003 *Electr. Power Syst. Res.* **65** 187
- [10] Wei D Q, Luo X S, Qin Y H 2010 *International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)* Wuhan, China, June 25—27, 2010 p2185
- [11] Qin Y H, Luo X S, Wei D Q 2010 *Chin. Phys. B* **19** 050511
- [12] Jia H J, Yu Y X, Zhang P, Yu X D, Huang C H 2004 *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering* Montreal, Canada, May 2—5, 2004 p73
- [13] Chiang H D, Liu C W, Varaiya P P, Wu F F, Lauby M G 1993 *IEEE Trans. Power Syst.* **8** 1407
- [14] Wang B H, Yang C W, Zhang Q 2005 *Trans. China Electrotech. Soc.* **20** 1 (in Chinese) [王宝华, 杨成梧, 张强 2005 电工技术学报 **20** 1]
- [15] Chen X W, Zhang W N, Zhang W D 2005 *IEEE Trans. Circuits Syst.* **52** 811
- [16] Song Y Z, Zhao G Z, Qi D L 2006 *Proc. Chin. Soc. Univ. Electr. Power Syst. Autom.* **18** 5 (in Chinese) [宋运忠, 赵光宙, 齐冬莲 2006 电力系统及其自动化学报 **18** 5]
- [17] Wang B H, Zhang Q, Su R X 2002 *J. Nanjing. Inst. Technol.* **2** 8 (in Chinese) [王宝华, 张强, 苏荣兴 2002 南京工程学院学报 **2** 8]
- [18] Tan W, Li Z P, Zhang M 2010 *J. Hunan. Uni. Sci. Eng.* **25** 59 (in Chinese) [谭文, 李志攀, 张敏 2010 湖南科技大学学报 **25** 59]
- [19] Wei D Q, Qin Y H 2011 *Fourth International Workshop on Chaos-Fractals Theories and Applications (IWCFTA)* Hangzhou, China, October 19—22, 2011 p295
- [20] Ginarsa I M, Soeprijanto A, Purnomo M H 2013 *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* **46** 79
- [21] Wei D Q, Luo X S 2007 *Chin. Phys.* **16** 3244
- [22] Wang B H, Zhang Q, Yang C W, Yang W 2003 *Electr. Power Autom. Equip* **23** 9 (in Chinese) [王宝华, 张强, 杨成梧, 杨伟 2003 电力自动化设备 **23** 9]
- [23] Zhu Z Y, Liu W T, Cai L Y 2009 *Ship Eng.* **31** 36 (in Chinese) [朱志宇, 刘韦亭, 蔡立勇 2009 船舶工程 **31** 36]
- [24] Chang Y C 2010 *Sci. Technol. Eng.* **10** 6194 (in Chinese) [常艳超 2010 科学技术与工程 **10** 6194]
- [25] Zhao H, Ma Y J, Liu S J, Gao S G, Zhong D 2011 *Chin. Phys. B* **20** 120501
- [26] Xu Y Q, Mao J S, Liu J F, Jia F, Shen S Q 2012 *Electr. Meas. Instrum.* **49** 27 (in Chinese) [许燕青, 毛家松, 刘建峰, 贾锋, 沈胜强 2012 电测与仪表 **49** 27]
- [27] Chung C Y, Lin C L 1999 *IEEE Trans. Aut. Control* **44** 563
- [28] Yau H T 2008 *Mech. Syst. Signal Process* **22** 408
- [29] Guo H J, Liu J H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4080 (in Chinese) [郭会军, 刘君华 2004 物理学报 **53** 4080]
- [30] Yuan L, Shen J Q, Xiao F, Chen M L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 030501 (in Chinese) [袁雷, 沈建清, 肖飞, 陈明亮 2013 物理学报 **62** 030501]
- [31] Hossin G, Amir H, Azita A 2013 *Chin. Phys. B* **22** 010503
- [32] Park K B, Tsuji T 1999 *Int. J. Robust Nonlinear Control* **9** 769
- [33] Liu J K 2005 *Matlab Simulation for Sliding Mode Control* (Beijing: Tsinghua University Press) p362 (in Chinese) [刘金焜 2005 滑模变结构控制 MATLAB 仿真 (北京: 清华大学出版社) 第 362 页]
- [34] Liu M J, Piao Z L, Wu X H 2009 *Electr. Power Autom. Equip* **29** 85 (in Chinese) [刘美菊, 朴在林, 吴秀华 2009 电力自动化设备 **29** 85]
- [35] Yuan L, Wu H S, Tu J J 2010 *Electr. Power Autom. Equip* **30** 82 (in Chinese) [袁雷, 吴汉松, 涂建军 2010 电力自动化设备 **30** 82]

Fuzzy fast terminal sliding mode controller using an equivalent control for chaotic oscillation in power system*

Ni Jun-Kang[†] Liu Chong-Xin[‡] Pang Xia

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 11 May 2013; revised manuscript received 26 June 2013)

Abstract

Chaotic oscillation in a power system is taken to be the main cause for power blackouts in large-scale interconnected power grid. This paper studies a 2-D power system with chaotic oscillation dynamic behaviors through parameter phase portraits, Lyapunov exponents, time-domain waveform graph and proposes fuzzy fast terminal sliding mode controller based on equivalent control to stabilize the power system to synchronization status. Simulation results show that our control scheme can not only speed up convergence rate, but also have smooth control action, reduce control energy and suppress chattering phenomenon effectively.

Keywords: power system chaotic oscillation, equivalent sliding mode control, fuzzy sliding mode control, fast terminal sliding mode control

PACS: 05.45.Gg, 05.45.Ac, 05.45.Xt, 84.70.+p

DOI: 10.7498/aps.62.190507

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51177117), the Creative Research Groups Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51221005), and the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20100201110023).

[†] Corresponding author. E-mail: max12391@126.com

[‡] Corresponding author. E-mail: liucx@mail.xjtu.edu.cn