

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.03.007

混沌双机互联电力系统在混合脉冲控制下的有限时间稳定性

李梦歌¹, 刘 斌², 杨 祯², 刘东南²

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南工业大学 理学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对混沌电力系统可能导致相角发散、电压崩溃, 严重的甚至导致停电等问题, 提出了一种基于混合脉冲控制的混沌双机互联电力系统有限时间稳定控制策略。在混沌双机互联电力系统中, 给出其有限时间稳定的混合脉冲控制设计, 用混合脉冲控制能使其在有限时间内进入稳定运行状态。最后, 通过仿真实验验证了所用方法及所提控制策略的有效性与正确性。

关键词: 混沌双机互联电力系统; 混合脉冲控制; 有限时间稳定性; 输入-状态-稳定性

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)03-0048-07

引文格式: 李梦歌, 刘 斌, 杨 祯, 等. 混沌双机互联电力系统在混合脉冲控制下的有限时间稳定性[J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(3): 48-54.

Finite Time Stability of Chaotic Dual Machine Interconnected Power Systems Under Mixed Pulse Control

LI Mengge¹, LIU Bin², YANG Zhen², LIU Dongnan²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. College of Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of such problems as phase divergence, voltage collapse, and even power outages found in chaotic power systems, a finite time stability control strategy, which is based on hybrid pulse control, has thus been proposed for chaotic dual machine interconnected power systems. In a chaotic dual machine interconnected power system, a finite time stable hybrid pulse control design is proposed, enabling it to enter a stable operating state within a finite time. Finally, the effectiveness and validity of the proposed method and control strategy are to be verified through simulation experiments.

Keywords: chaotic dual machine interconnected power system; hybrid pulse control; finite-time stability; input-state-stability

1 研究背景

随着社会的发展, 各行各业对电的需要量不断增

大^[1], 大规模的电网互联是一种趋势, 它具有强大的节能功能, 是当今节约型社会的必然选择。电力给人们带来便利的同时, 其系统稳定也面临着一定的挑

收稿日期: 2024-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62073132); 湖南省教育厅科研基金资助优秀青年项目(23B0568)

作者简介: 李梦歌, 女, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为微电网系统稳定运行与控制, E-mail: 1171405525@qq.com

通信作者: 刘 斌, 男, 湖南工业大学教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为微电网与混合网络的稳定性与分布式控制, E-mail: liubin@hut.edu.cn

战。电力系统本身是一个多变量、强非线性的动态系统,且具有复杂的非线性动力学行为,因此,其更容易引发整个电力系统的剧烈振荡,甚至失稳^[2-4],电力系统混沌振荡现象在一定程度上会影响电力系统的稳定运行^[5]。所以,采取有效的控制策略对电力系统的混沌振荡现象加以控制,对整个电力系统的安全稳定运行具有重要意义。

已有较多文献研究了如何抑制电力系统的混沌行为。如文献[2]在常规滑模控制中引入了干扰观测器,有效地控制了电力系统的混沌振荡现象。文献[6]提出了反演滑模变控制方法,能有效地控制电力系统的混沌振荡现象。为了抑制电力系统的混沌行为,文献[7]提出了一种基于继电特性函数的准滑动模态控制方法。文献[8]设计并改进了自适应全局滑模控制器,有效地消除了电力系统的混沌振荡现象。文献[9]提出了非线性反馈控制和自适应控制两种控制方案,两方案均可使混沌电力系统达到渐近稳定。文献[10]研究了基于脉冲控制的混沌系统有限时间和固定时间问题,给出了混沌系统的固定时间和有限时间同步判据。文献[11]设计了一种基于非线性扩张观测器的非奇异终端滑模控制方案,减小了系统的抖震幅度。

上述针对混沌双机互联电力系统的研究中,大多集中于采用连续控制方法来应对双机互联电力系统中的混沌现象,而对离散控制方法的探讨相对较少,且很少有控制可以将受干扰的混沌电力系统的干扰完全消除并将其状态稳定到其平衡位置。在此背景下,脉冲控制作为一种离散控制方法,因其耗能较低、实施简单,以及成本较低等优点,显示出更广泛的应用潜力。因此,脉冲控制吸引了许多研究者的兴趣,其发展也越来越快^[12]。脉冲控制已经被广泛地应用在各个领域,如航天领域、机械领域等^[13-15]。本文拟将脉冲控制引入受干扰的混沌电力系统的稳定控制之中。

且在已有文献中,对于电力系统混沌振荡的控制,大多是在 Lyapunov 稳定性意义下的,即在无限时间范围内考虑其稳定性,很少有考虑其在有限时间内达到稳定的研究。

鉴于以上分析,本文拟对一个混沌双机互联电力系统,设计混合脉冲控制,使其获得有限时间输入-状态-稳定性,并通过加强混合脉冲控制,使混沌双机互联电力系统在有限时间内进一步消除外界扰动,进入稳定运行状态。

2 双机互联电力系统模型及问题描述

本文主要研究周期性负荷扰动对电力系统的影响,

以双机互联电力系统为例,为了突出电力系统外在因素对电力系统的影响,暂且不考虑系统网侧等值系统的内在因素影响,选用的双机互联电力系统接线图如图1所示。

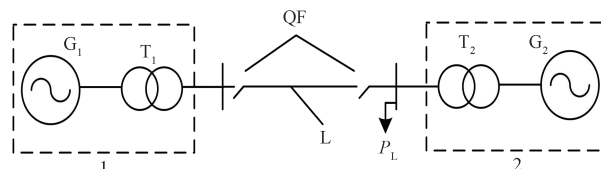


图1 双机互联电力系统接线图

Fig. 1 Wiring of the dual-machine interconnected power system

图1中, G_1 、 G_2 分别为区域1、2的等值发电机, T_1 、 T_2 分别为区域1、2的等值变压器, QF 为断路器, L 为区域联络线, P_L 为负荷。假设同步发电机机械功率在暂态过程中始终恒定,其暂态凸极效应可不计。此电力系统的简化模型如下:

$$\begin{cases} \frac{d\delta(t)}{dt} = \omega(t), \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = -\frac{1}{H} P_s \sin \delta(t) - \frac{D}{H} \omega(t) + \frac{1}{H} P_m + \frac{1}{H} P_e \cos(\beta t). \end{cases} \quad (1)$$

式中: δ 为系统1、2间的等值发电机 q 轴电势间的相对角度, rad; ω 为系统1、2间的等值发电机的相对角速度, rad/s; P_s 、 P_m 分别为发电机的电磁功率和机械功率, W; H 为系统等值转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; D 为等值阻尼系数, $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$; P_e 和 β 分别为扰动功率幅值和频率, 单位为 W 和 Hz。

为了分析电力系统的动力学特性, 令 $\alpha = P_s/H$, $\gamma = D/H$, $\rho = P_m/H$, $F = P_e/H$, 对数学模型(1)进行简化处理, 可得式(2)。

$$\begin{cases} \frac{d\delta(t)}{dt} = \omega(t), \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = -\alpha \sin \delta(t) - \gamma \omega(t) + \rho + F \cos(\beta t). \end{cases} \quad (2)$$

令 $x_1 = \delta(t)$ 、 $x_2 = \omega(t)$, 则可进一步将式(2)整理成式(3), 因此, 电力系统的数学模型一般形式为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\alpha \sin x_1 - \gamma x_2 + \rho + F \cos(\beta t). \end{cases} \quad (3)$$

由电力系统的数学模型(3)可知, 此电力系统的数学模型为二阶非线性微分方程组, 当各参数取适当值时, 系统就会出现混沌振荡现象(参见第4部分的系统仿真), 此时, 该电力系统是不稳定的。为了降低不稳定的混沌振荡带来的不良影响, 本文将针对具有混沌现象的电力系统(3), 设计有限时间混合

脉冲控制策略, 让不稳定的电力系统(3)获得有限时间输入-状态-稳定性。

3 脉冲系统有限时间输入-状态-稳定性

已有大多数系统稳定性的研究都是基于无限时间的 Lyapunov 稳定分析, 但实际应用中, 如航天器的对接、行驶过程中的汽车遇到意外状况等, 考虑其在有限时间内的稳定更为重要。本文研究含外部干扰的双机互联电力系统(3)在混合脉冲控制下的有限时间输入状态稳定性, 并提出相应控制策略、稳定性概念及判据。

为了给电力系统(3)设计混合脉冲控制策略, 将在这一部分中给出脉冲系统在外界干扰下的有限时间输入状态稳定性的概念与判据。

3.1 脉冲系统的有限时间输入-状态-稳定性概念

具有外界干扰输入的脉冲系统可以表示如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = f(t, \mathbf{x}(t)) + \mathbf{w}(t), & t \notin S; \\ \Delta \mathbf{x}(t) = \mathbf{I}_k(\mathbf{x}(t)), & t = t_k \in S; \\ \mathbf{x}(t_0^+) = \mathbf{x}_0, & t \geq t_0, k \in \mathbf{Z}_+ \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$; $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x}(t^+) - \mathbf{x}(t)$; f 为 $\mathbf{R}_+ \times \mathbf{R}_+ \rightarrow \mathbf{R}^n$, 满足 $f(t, 0) = 0$; $\mathbf{I}_k$ 为 $\mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$ 且 $\mathbf{I}_k(0) = 0$; $(\mathbf{x}_0, t_0)$ 为最初的状态; 脉冲序列 $S = \{t_k\}$ 满足 $0 \leq t_0 < t_1 < \dots < t_k < \dots$; $\mathbf{w}(t)$ 为外界干扰输入。

定义 1^[16] i) 考虑无干扰的脉冲系统(4), 即 $\mathbf{w}(0) = 0$ 。对于给定的一个集合 $U \subseteq \mathbf{R}^n$, 且有 $0 \in U$, 如果对于 $\forall \mathbf{x}(t) \in U$, 存在

$$\|\mathbf{x}(t)\| = 0, \quad \forall t \geq t_0 + T(\mathbf{x}_0, \{t_k\}), \quad (5)$$

则称无干扰的系统(4)在 (U, S) 是有限时间收敛的, 且 $T(\mathbf{x}_0, \{t_k\})$ 称为稳定时间 (settling time)。如果 $U = \mathbf{R}^n$, 则称无干扰的系统(4)是全局有限时间收敛的。

ii) 对于给定的一个集合 $U \subseteq \mathbf{R}^n$, 且有 $0 \in U$, 如果无干扰的系统(4)在 (U, S) 是有限时间收敛的, 稳定时间为 $T(\mathbf{x}_0, \{t_k\})$, 且 $\forall \varepsilon > 0, \exists \delta = \delta(\varepsilon)$, 则可以得到 $\forall t \in [t_0, t_0 + T(\mathbf{x}_0, \{t_k\})]$,

$$\|\mathbf{x}_0\| < \delta \Rightarrow \|\mathbf{x}(t)\| < \varepsilon. \quad (6)$$

则称无干扰的系统(4)在 (U, S) 上是有限时间稳定的。如果 $U = \mathbf{R}^n$, 那么, 无干扰的系统(4)是全局有限时间稳定的。

定义 2^[16] i) 一个函数 $\gamma: \mathbf{R}_+ \rightarrow \mathbf{R}_+$ 属于广义类 GK 类函数 ($\gamma \in GK$), 如果连续函数 $\gamma(0) = 0$, 且 $\forall s_1 > s_2 \geq 0$,

$$\begin{cases} \gamma(s_1) > \gamma(s_2), & \gamma(s_1) \neq 0; \\ \gamma(s_1) = \gamma(s_2) = 0, & \gamma(s_1) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

ii) 函数 $\tilde{\beta}: \mathbf{R}_+ \times \mathbf{R}_+ \rightarrow \mathbf{R}_+$ 属于广义类 GK 类函数 ($\beta \in GK$), 如果 $t \geq 0, \tilde{\beta}(\cdot, t) \in GK$, 对于 $a \geq 0$, 存在 $0 \leq T < \infty$ 时 $T = T(a)$, 当 $t \rightarrow T$ 时 $\tilde{\beta}(a, t)$ 趋近于 0。

对于函数 $\tilde{\beta} \in GK$ 且 $a \geq 0$, 定义:

$$Z_{\tilde{\beta}}(a) \triangleq \inf \{s \in \mathbf{R}_+ : \tilde{\beta}(a, s) = 0\}. \quad (8)$$

通过定义 GK 类函数, 对于任意的 $a \geq 0$, 都有唯一的 $Z_{\tilde{\beta}}(a) \geq 0$, 满足 $Z_{\tilde{\beta}}(0) = 0$ 及 $Z_{\tilde{\beta}}(a) < \infty$ 。因此, $Z_{\tilde{\beta}}: \mathbf{R}_+ \rightarrow \mathbf{R}_+$ 是一个不减的函数, 且满足 $Z_{\tilde{\beta}}(0) = 0$ 。而且如果 $a > 0$, 则 $0 < Z_{\tilde{\beta}}(a) < \infty$, 称 $Z_{\tilde{\beta}}(\cdot)$ 为关于 $\tilde{\beta} \in GK$ 的稳定时间函数, $Z_{\tilde{\beta}}(a)$ 是关于 $\tilde{\beta}, a$ 的稳定时间。

定义 3^[16] 对于一个集合 $U \subseteq \mathbf{R}^n$ 且 $0 \in U$, 若在式(4)中, $\mathbf{w}(t) = 0$, 且存在 $\tilde{\beta} \in GK$, 使得 $\forall \mathbf{x}_0 \in U$,

$$\|\mathbf{x}(t)\| \leq \tilde{\beta}(\|\mathbf{x}_0\|, t - t_0), \quad \forall t > t_0. \quad (9)$$

则称无干扰的系统(4)是 GK 有限时间稳定的, 且稳定时间 $T(\mathbf{x}_0, \{t_k\})$ 满足 $T(\mathbf{x}_0, \{t_k\}) \leq Z_{\tilde{\beta}}(\|\mathbf{x}_0\|)$ 。

定义 4 对于一个集合 $U \subseteq \mathbf{R}^n$, 且有 $0 \in U$, 系统(4)在 (U, S) 上如果存在 $\tilde{\beta} \in GK$ 且 $\phi \in K_\infty$, 使得 $\forall \mathbf{x}_0 \in U, \forall t > t_0$,

$$\|\mathbf{x}(t)\| \leq \tilde{\beta}(\|\mathbf{x}_0\|, t - t_0) + \phi(\|\mathbf{w}(t)\|), \quad (10)$$

则称系统(4)是有限时间输入-状态-稳定的, 且这个有限时间输入-状态-稳定的 $T(\mathbf{x}_0, \{t_k\})$ 满足 $T(\mathbf{x}_0, \{t_k\}) \leq Z_{\tilde{\beta}}(\|\mathbf{x}_0\|)$ 。

因此, 当系统(4)是有限时间输入-状态-稳定的, 且满足式(10)时, 则有 $\forall t > t_0 + T(\mathbf{x}_0, \{t_k\})$,

$$\|\mathbf{x}(t)\| \leq \phi(\|\mathbf{w}(t)\|). \quad (11)$$

定义 5 对于拟-Lyapunov 函数, $V(t, \mathbf{x})$ 沿着系统(4)在 $\mathbf{w}(t) = 0$ 时的 Dini 导数定义为

$$D^+V(t, \mathbf{x}) = \limsup_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} \{V[t+h, \mathbf{x}+hf(t, \mathbf{x})] - V(t, \mathbf{x})\}. \quad (12)$$

3.2 脉冲系统有限时间输入-状态-稳定性的比较原理

假设 1^[16] 假设存在函数 $V \in C[\mathbf{R}_+ \times \mathbf{R}^n, \mathbf{R}_+]$ 满足:

i) 存在一个 K 类函数 $c_1, c_2 \in K_\infty$ 使得 $\forall (t, \mathbf{x}) \in \mathbf{R}_+ \times \mathbf{R}^n$ 时, 有

$$c_1(\|\mathbf{x}(t)\|) \leq V(t, \mathbf{x}(t)) \leq c_2(\|\mathbf{x}(t)\|); \quad (13)$$

ii) 存在一个连续函数 $h: \mathbf{R}_+ \times \mathbf{R}_+ \times \mathbf{R}_+ \rightarrow \mathbf{R}_+$, 对于每一个 t 在 s 上 $h(t, s)$ 都为非减函数, 满足

$$D^+V \leq h(t, V(t, \mathbf{x}), \|\mathbf{w}\|); \quad (14)$$

iii) 存在一个非递减函数 $\psi_k: \mathbf{R}_+ \rightarrow \mathbf{R}_+$, 使得

$$V(t, \mathbf{x} + I_k(\mathbf{x})) \leq \psi_k(V(t, \mathbf{x})). \quad (15)$$

设 $\mathbf{y}(t)$ 为与假设 1 相关的脉冲系统的最大解:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{y}} = h(t, \mathbf{y}, \|\mathbf{w}\|), & t \notin S; \\ \mathbf{y}(t^+) = \psi_k(\mathbf{y}(t)), & t = t_k \in S; \\ \mathbf{y}(t_0^+) = \mathbf{y}_0 \geq 0. \end{cases} \quad (16)$$

引理 1 令假设 1 成立, 且在脉冲系统 (16) 中, 满足 $\mathbf{y}_0 \geq V(t_0, \mathbf{x}_0)$, 如果脉冲系统 (16) 是有限时间输入-状态-稳定的, 则原来的脉冲系统 (4) 也是有限时间输入-状态-稳定的。

证明 对于脉冲系统 (16), 假设在 $[t_0, +\infty)$ 上存在解 $\mathbf{y}(t)$ 。然后, 通过文献 [17] 中的定理 3.2, 可以得到 $\forall \mathbf{x}_0 \in \mathbf{R}^n$, 系统 (4) 在 $[t_0, +\infty)$ 存在解 $\mathbf{x}(t)$, 由 $V(t_0^+, \mathbf{x}_0) \leq \mathbf{y}_0$ 可知, 当 $t \geq t_0$ 时, $V(t, \mathbf{x}(t)) \leq \mathbf{y}(t)$ 。

假设脉冲系统 (16) 是有限时间输入-状态-稳定的, 且稳定时间 $T_y(\mathbf{y}_0, \{t_k\}) > 0$ 。即 $\mathbf{y}(t)$ 满足 $\mathbf{y}(t) \leq \phi(\|\mathbf{w}\|)$, $\forall t \geq t_0 + T_y$, $\phi \in K_\infty$, 对于给定的一个 $\mathbf{x}_0$ 满足 $V(t_0^+, \mathbf{x}_0) \leq \mathbf{y}_0$, 通过假设 1 中 i 和 $V(t, \mathbf{x}(t)) \leq \mathbf{y}(t)$, $t \geq t_0$, 可以得到 $\forall t \geq t_0 + T_y(\mathbf{y}_0, \{t_k\})$,

$$\|\mathbf{x}(t)\| \leq c_1^{-1} V(t, \mathbf{x}(t)) \leq c_1^{-1}(\mathbf{y}(t)). \quad (17)$$

系统 (16) 为有限时间输入-状态-稳定, 意味其为有限时间有界, 即对于所有的 $t \in [t_0, t_0 + T_y(\mathbf{y}_0, \{t_k\})]$, 存在 $\forall \epsilon > 0$, $\exists \delta_1 = \delta_1(\epsilon)$, 使得 $\mathbf{y}_0 < \delta_1 \Rightarrow \mathbf{y}(t) < c_1(\epsilon)$ 。选取 δ 使 $0 < \delta = \delta(\epsilon) < c_2^{-1}(\delta_1(\epsilon))$, $\delta(\epsilon) < c_2^{-1}(\delta_1(\epsilon))$, 由于 $c_2 \in \mathcal{K}$, 可得 $c_2(\delta) < \delta_1$ 。对于任意满足 $\|\mathbf{x}_0\| < \delta$ 的 $\mathbf{x}_0$, 选取满足 $c_2(\delta) \leq \mathbf{y}_0 \leq \delta_1$ 的 $\mathbf{y}_0$, 然后可知 $\forall t \in [t_0, T_y(\mathbf{y}_0, \{t_k\})]$, 都有 $\mathbf{y}(t) < c_1(\epsilon)$ 成立。并且通过假设 1, 可得

$$V(t_0^+, \mathbf{x}_0) \leq c_2(\|\mathbf{x}_0\|) \leq c_2(\delta) \leq \mathbf{y}_0. \quad (18)$$

由式 (13) 可知, 对于 $\forall t \in [t_0, t_0 + T_y(\mathbf{y}_0, \{t_k\})]$, 有

$$\|\mathbf{x}(t)\| \leq c_1^{-1} V(t, \mathbf{x}(t)) \leq c_1^{-1}(\mathbf{y}(t)). \quad (19)$$

所以, 由上述条件可知, 脉冲系统 (4) 是有限时间有界的。脉冲系统 (16) 是有限时间输入-状态-稳定的, 这意味着脉冲系统 (4) 是有限时间输入-状态-稳定的。证毕。

3.3 脉冲系统有限时间输入-状态-稳定性判据

定理 1 函数 $V \in C[\mathbf{R}_+ \times \mathbf{R}^n, \mathbf{R}_+]$ 满足假设 1 中 i, 存在 $\alpha > 0, d < 0, \lambda > 0$, 且当 $V > g(\|\mathbf{w}\|)$ (其中 g 为某个 K -类函数) 时,

$$D^+ V|_{(4)} \leq \alpha V - \lambda \operatorname{sgn}(V), \quad (20)$$

$$V(t, \mathbf{x} + I_k(\mathbf{x})) \leq e^d V(t, \mathbf{x}), \quad k \in \mathbf{Z}_+. \quad (21)$$

如果脉冲时间序列 S 满足以下平均停留时间条件: 对于 $0 \leq N_0 < 1, 0 < \tau_a < -d/\alpha$, 满足

$$N(t_0, t] \geq N_0 + (t - t_0)/\tau_a, \quad \forall t > t_0 \geq 0, \quad (22)$$

则系统 (4) 是有限时间输入-状态-稳定的, 且稳定时间满足:

$$T(\mathbf{x}_0, \{t_k\}) \leq \frac{\tau_a}{\alpha \tau_a + d} \ln \frac{\tilde{\lambda} e^{(1-N_0)d}}{\alpha V(t_0^+, \mathbf{x}_0)}. \quad (23)$$

式中: $\tilde{\lambda} = \min\{\lambda, \alpha V(t_0^+, \mathbf{x}_0)\}$, 其中 $N(t_0, t]$ 为区间 $(t_0, t]$ 的脉冲次数。

证明 令 $m(t_0^+) = V(t_0^+, \mathbf{x}_0)$, 并且对于所有的 $t \geq t_0$, 可得 $m(t) = V(t, \mathbf{x}(t))$ 。由式 (20) 及式 (21) 可知 $0 < \tilde{\lambda} < \lambda$, 可以得到当 $m(t) > g(\|\mathbf{w}\|)$ 时, 满足

$$\begin{cases} D^+ m(t) \leq \alpha m(t) - \tilde{\lambda}, & t \notin S; \\ m(t^+) \leq e^d m(t), & t \in S. \end{cases} \quad (24)$$

因此, 令 $\mathbf{y}_0 = m(t_0^+) = V(t_0^+, \mathbf{x}_0)$, 可以得到当 $m(t) > g(\|\mathbf{w}\|)$ 时, 满足

$$\begin{cases} D^+ \mathbf{y}(t) = \alpha \mathbf{y}(t) - \tilde{\lambda}, & t \notin S; \\ \mathbf{y}(t^+) = e^d \mathbf{y}(t), & t \in S. \end{cases} \quad (25)$$

通过式 (25) 可知, 因 $\alpha > 0$ 且 $d < 0$, $\forall t \in (t_0, t_1]$, $\mathbf{y}(t) = e^{\alpha(t-t_0)} \mathbf{y}(t_0)$, 所以 $\forall t \in (t_k, t_{k+1}]$, $k \geq 1$, 可得

$$\mathbf{y}(t) = e^{\alpha(t-t_0)+d} \mathbf{y}(t_k) + \frac{\tilde{\lambda}}{\alpha} - \frac{\tilde{\lambda}}{\alpha} e^{\alpha(t-t_k)}. \quad (26)$$

令 $\tilde{\lambda} = \min\{\lambda, \alpha \mathbf{y}_0\}$, $\mu = \frac{\tilde{\lambda}}{\alpha} (e^{\alpha \Delta_{\inf}} - 1) > 0$, 且 $\theta_k = \alpha \Delta_k + d$, 则通过式 (25) (26) 可得

$$\mathbf{y}(t_{k+1}) \leq e^{\theta_k} \mathbf{y}(t_k) - \mu. \quad (27)$$

令 $\mathbf{b}(0) = e^{-d} \mathbf{y}_0$, 且对于所有的 $k \in \mathbf{Z}^+$, $\mathbf{b}(k) = \mathbf{y}(t_k)$ 。

式 (27) 满足 $\mathbf{b}(k+1) \leq e^{\sum_{i=1}^k \theta_i} \mathbf{b}(0) - \mu \left(1 + e^{\theta_k} + \dots + e^{\sum_{i=1}^k \theta_i}\right)$ 。

因此, 对于 $\forall t \in (t_k, t_{k+1}]$, 可得

$$\mathbf{y}(t) \leq e^{\alpha(t-t_0)+kd} \mathbf{y}_0 - \frac{\tilde{\lambda}}{\alpha} \tilde{\varphi}(t-t_0). \quad (28)$$

式中: $\forall t \in (t_0, t_1]$, $\tilde{\varphi}(t-t_0) = e^{\alpha(t-t_0)} - 1$, 可以得到 $\tilde{\varphi} = e^{\alpha(t-t_k+t_0)} - 1 + (e^{\alpha \Delta_{\inf}} - 1) \cdot (e^{\alpha(t-t_k+t_0)+d} + e^{\alpha(t-t_k+t_0)+2d} + \dots + e^{\alpha(t-t_k+t_0)+kd})$, $\forall t \in (t_k - t_0, t_{k+1} - t_0]$, 显然 $\tilde{\varphi}$ 是不减函数。

从式 (22) 可得, 对于所有的 $t \in (t_k, t_{k+1}]$, 满足

$$\alpha(t-t_0) + (k+1)d \leq N_0 d - \tilde{\alpha}(t-t_0). \quad (29)$$

式中 $\tilde{\alpha} = -(\alpha + d/\tau_a)$ 。

通过 $\tau_a < -d/\alpha$, 可得 $\tilde{\alpha} > 0$, 从式 (28) (29) 可得系统 (25) 是有限时间稳定的, 且稳定时间为 T_{y_0} 。

然后, $\mathbf{y}(t) = 0$, $\forall t \geq t_0 + T_{y_0}$ 。

令 $\Delta_{\inf} = \min_{t_k \leq t_0 + T_{y_0}} \{t_{k+1} - t_k\}$, $\Delta_{\inf} > 0$, 假设 $\{t_k\}$ 满足:

$\forall k \in \mathbf{Z}_+, t \in (t_k, t_{k+1}], k \geq 1$, 得到 $0 < \Delta_{\inf} \leq t_{k+1} - t_k$ 。根据 $\tilde{\varphi}$ 的定义及 C-ADT (22), 可得

$$\tilde{\varphi}(t - t_0) \geq e^d (1 - e^{(\alpha \Delta_{\inf} + d)(k+1)}) > e^d. \quad (30)$$

由文献 [18] 中的引理 2.5 可知, 存在 $\varphi \in k, \forall s \in \mathbf{R}_+$ 可得 $\varphi(s) \leq \tilde{\varphi}(s)$, 以及对于所有的 $s \in (t_k, t_{k+1}], k \geq 1$, 可得 $\varphi(s) \geq e^d$, 定义 $\beta(a, s) = \phi_1(a) e^{-\tilde{\alpha}s}$ 和 $\phi_1(s) = e^{N_0 d} s$, $\phi_2(s) = \min\{\lambda, \alpha s\}/\alpha, \forall s \in \mathbf{R}_+$ 。然后, $\phi_1 \in \mathcal{K}_\infty, \phi_2 \in \mathcal{K}_0, \beta \in \mathcal{KL}$, 再通过式 (28) 可知, 当 $V > g(\|w\|)$ 时

$$y(t) \leq \phi_1(y_0) e^{-\tilde{\alpha}(t-t_0)} - \phi_2(y_0) \varphi(t - t_0) = \beta(y_0, t - t_0) - \phi_2(y_0) \varphi(t - t_0), \quad t \geq t_0. \quad (31)$$

因此, 脉冲系统 (25) 是有限时间输入 - 状态 - 稳定的, 并且稳定时间满足 $T_{y_0} \leq T_y$, 且 T_y 满足 $T_y \leq \tau_a / (\alpha \tau_a + d) \cdot \ln(\tilde{\lambda} e^{(1-N_0)d} / (\tau_a y_0))$ 。由引理 1 可得原系统 (4) 也是有限时间输入 - 状态 - 稳定的。证毕。

4 电力系统有限时间输入 - 状态 - 稳定的混合脉冲控制设计与仿真

4.1 混合脉冲控制设计

对于二阶互联电力系统 (3), 设计如下混合脉冲控制:

$$u(t) = (u_1(t), u_2(t))^T = \sum_{k=1}^{\infty} \delta(t - t_k) Kx - \lambda \operatorname{sgn}(x(t)), \quad (32)$$

式中: $K = \operatorname{diag}\{b_1, b_2\} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$, 其中 b_1, b_2 为待定控制参数, 且 $b_1 \in (-1, 0), b_2 \in (-1, 0)$; λ 为待定的控制参数, 且 $\lambda > 0$; $\operatorname{sgn}(x(t)) = (\operatorname{sgn}(x_1(t)), \operatorname{sgn}(x_2(t)))^T$ 。

下面将对一个具体的双机互联电力系统, 给出具体的混合脉冲控制的参数设计。

首先, 取系统 (3) 的各个参数及取值见表 1。

表 1 系统参数及取值

Table 1 Values for system parameters

参数	α	γ	ρ	F
取值	1	0.02	0.2	0.1

且令系统 (3) 初值为 $(-1.5, 0.1)$, $w_1(t) = 0$, $w_2(t) = 0.2 + 0.1 \cos t$, 电力系统产生混沌现象, 则电力系统状态方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + w_1(t), \\ \dot{x}_2 = -\sin x_1 - 0.02x_2 + w_2(t). \end{cases} \quad (33)$$

令 $V(x) = \frac{1}{2} \|x\|^2 = \frac{1}{2} (x_1^2 + x_2^2)$, 让 $V(t) = V(x(t))$, 可以得到

$$D^+V|_{(33)} = x_1 x_2 - x_2 \sin(x_1) - 0.02x_2 + x_1 w_1(t) + x_2 w_2(t) \leq (1 + 2 \times 0.98)V + \|w\|^2 = \alpha * V + k_w \|w\|^2。$$

则通过系统的 Dini 导数可以很容易看出当令控制项为 0 即不施加控制时, 电力系统 (33) 是不稳定的且不是输入状态稳定的。

在式 (32) 中, 取 $\lambda = 0.001 > 0$, 则在混合脉冲控制式 (32) 下, 系统 (3) 可整理为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + w_1(t) - 0.001 * \operatorname{sgn}(x_1), & t \neq t_k; \\ \dot{x}_2 = -\sin x_1 - 0.02x_2 + w_2(t) - 0.001 * \operatorname{sgn}(x_2), & t \neq t_k; \\ x_1(t^+) = b_1 x_1(t), & t = t_k; \\ x_2(t^+) = b_2 x_2(t), & t = t_k. \end{cases} \quad (34)$$

定义 $V(t) = V(x(t))$, 通过式 (34), 可以得到

$$D^+V|_{(34)} \leq (1 + 2 \times 0.98)V - 0.002V^{\frac{1}{2}} + \|w\|^2, \quad (35)$$

$$V(t^+) \leq e^{2 \max\{\ln(1+b_1), \ln(1+b_2)\}} V = e^d V(x). \quad (36)$$

可以得到 $k_w = 1, d_1 = 2 \max\{\ln(1+b_1), \ln(1+b_2)\}$, 令 $m(t) = V^{(1-1/2)}$, 可以得到

$$D^+m(t) = (1 - 0.5)V^{1/2} \times D^+V \leq (1 + 2 \times 0.98)m(t)/2 - 0.001 \operatorname{sgn}(m(t)), \quad (37)$$

得出 $\alpha = 1.48, \lambda = 0.001$ 。

如果取脉冲时间序列和脉冲控制参数 b_1, b_2 使得平均停留时间条件 (22) 满足, 则通过定理 1 可知, 系统 (34) 是有限时间输入 - 状态 - 稳定的, 并且其稳定时间满足

$$T(x_0, \{t_k\}) \leq \frac{\tau_a}{\alpha \tau_a + d} \ln \frac{\tilde{\lambda} e^{(1-N_0)d}}{\tau_a y_0}. \quad (38)$$

由分析可知 $b_1 = b_2 = -0.5$, 脉冲控制间隔为 0.2。混合控制中 $\lambda = 0.001$ 。令 $N_0 = 0, \tau_a = 0.05$, 则稳定时间为 $T(x_0, \{t_k\}) \leq 1.49$ 。

4.2 仿真结果与分析

系统初始值条件下, 不加任何控制时的电力系统状态时序图、相序图分别见图 2 和 3。

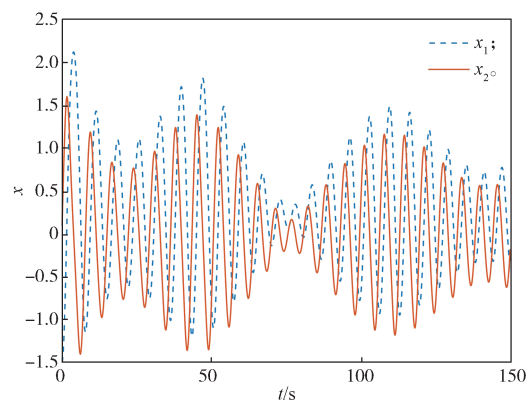


图 2 不加任何控制时的电力系统波形

Fig. 2 Power system waveform without any control

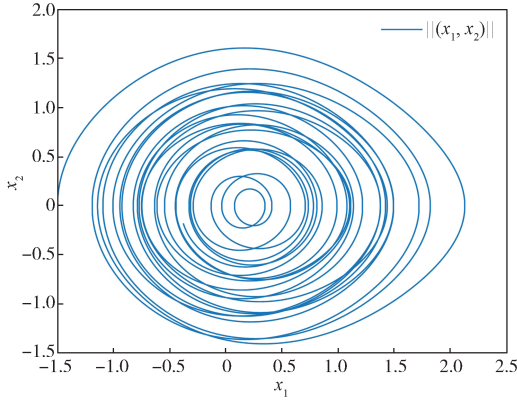
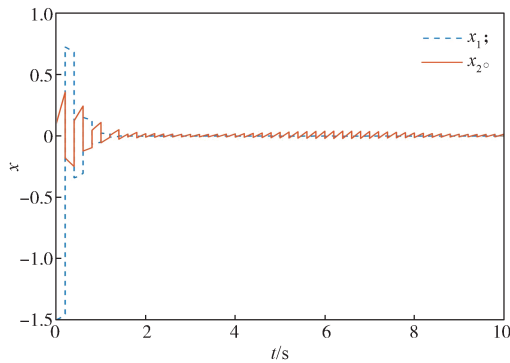


图3 不加任何控制时的电力系统相序图

Fig. 3 Phase sequence diagram of the power system without any control

由图2、3可知,系统相对角度与相对角速度做无规则的振荡运动,且随着仿真运行时间的增加,其无规则程度逐渐增加。系统吸引子相图为比较混乱的不封闭曲线。因此,此时电力系统处于混沌振荡状态。

当对电力系统施加混合脉冲控制后,电力系统的时序状态图如图4所示。

图4 $b_1=b_2=-0.5, \lambda=0.001$ 时, 电力系统时序图Fig. 4 Time sequence diagram of the power system with $b_1=b_2=-0.5, \lambda=0.001$

由图4可知,在有限时间内,系统达到输入-状态-稳定,且当达到稳定运行时间后满足:

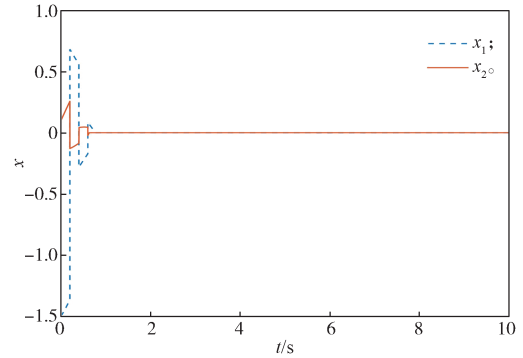
$$\mathbf{x}(t) \leq k_w \|\mathbf{w}\|_{\infty} = 1 \times 0.3 = 0.3。$$

因此,由所设计控制分析可知,电力系统处于输入-状态-稳定运行状态,消除了电力系统混沌现象。为了进一步减弱外部输入的干扰,加强混合脉冲控制,令控制项系数为 $\lambda > \max(\|\mathbf{w}\|_{\infty}) = 0.3$, 此时令 $\lambda = 0.5$ 。将 $\lambda = 0.5$ 代入系统中得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{x}_2 - 0.5 \operatorname{sgn}(x_1), & t \neq t_k; \\ \dot{x}_2 = -\sin x_1 - 0.02x_2 + 0.2 + 0.1 \cos t - 0.5 \operatorname{sgn}(x_2), & t \neq t_k; \\ \mathbf{x}(t^+) = \mathbf{K}\mathbf{x}(t), & t = t_k; \\ \mathbf{x}(t_0^+) = \mathbf{x}_0。 \end{cases}$$

(39)

再次用仿真软件进行仿真,可得加强混合脉冲控制后的电力系统时序波形图,如图5所示。

图5 $b_1=b_2=-0.5, \lambda=0.5$ 时, 电力系统时序图Fig. 5 Time sequence diagram of the power system with $b_1=b_2=-0.5, \lambda=0.5$

由图5可知,系统在0.8s后达到稳定状态,更进一步减弱了扰动的影响。这表明电力系统在有限时间内达到稳定运行,具有更强的实际意义。

5 结语

针对电力系统中混沌现象可能引发的大规模停电等严重事故,本文提出了一种混合脉冲控制策略,理论与仿真结果均表明,所提出的混合脉冲控制能有效地抑制电力系统混沌振荡,且能在有限时间内保证系统稳定运行,实现有限时间输入-状态-稳定性,而且通过加强混合脉冲控制,可以消除干扰对系统的影响,让受控系统获得有限时间稳定性。

参考文献:

- [1] 张振武. 电力系统及其自动化技术的安全控制问题及对策[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023(3): 8-11.
ZHANG Zhenwu. Security Control Issues and Counter-Measures of Power System and Its Automation Technology[J]. Chinese Science and Technology Journal Database(Full Text Edition) Engineering Technology, 2023(3): 8-11.
- [2] 崔浩, 章彦燕, 朱英伟, 等. 阻尼互联电力系统混沌振荡的滑模干扰观测器[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 4083-4090.
CUI Hao, ZHANG Yanyan, ZHU Yingwei, et al. Sliding Mode Interference Observer for Damping Chaotic Oscillation of Interconnected Power System[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 4083-4090.
- [3] 刘芳, 刘威, 汪浩东, 等. 高比例新能源电力系统振荡机理及其分析方法研究综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 95-114.

- LIU Fang, LIU Wei, WANG Haodong, et al. Review on Oscillation Mechanism and Analysis Methods of High Proportion Renewable Energy Power System[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 95–114.
- [4] 王 聪, 张宏立, 马 萍. 基于改进状态转移算法的不确定混沌电力系统参数辨识 [J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3057–3064.
- WANG Cong, ZHANG Hongli, MA Ping. Wind Identification of Parameters in Unknown Chaotic Power System Based on Improved State Transition Algorithm[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3057–3064.
- [5] 苗 斌. 基于混沌小扰动抑制的电力系统混沌振荡控制方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(9): 124–129.
- MIAO Bin. Research on Chaos Oscillation Control Method of Power System Based on Chaos Small Disturbance Suppression[J]. Computer Measurement & Control, 2023, 31(9): 124–129.
- [6] 杨晓辉, 王 毅, 刘小平, 等. 基于反演滑模变的电力系统混沌振荡控制 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(18): 221–225.
- YANG Xiaohui, WANG Yi, LIU Xiaoping, et al. Chaos Control in Power System Based on Backstepping Sliding Mode[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(18): 221–225.
- [7] 闵富红, 马美玲, 翟 炜, 等. 基于继电特性函数的互联电力系统混沌控制 [J]. 物理学报, 2014, 63(5): 70–77.
- MIN Fuhong, MA Meiling, ZHAI Wei, et al. Chaotic Control of the Interconnected Power System Based on the Relay Characteristic Function[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(5): 70–77.
- [8] 王家斌. 电力系统混沌振荡的分析与控制 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- WANG Jiabin. Analysis and Control of Chaotic Oscillation in Power System[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.
- [9] 华 存. 混沌系统的动力学行为分析及控制与同步 [D]. 天津: 河北工业大学, 2020.
- HUA Cun. Dynamic Behavior Analysis, Control and Synchronization of Chaotic System[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.
- [10] 张佳敏. 带有执行器饱和的混沌系统脉冲同步若干问题研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- ZHANG Jiamin. Research on Some Problems of Impulsive Synchronization in Chaotic Systems with Actuator Saturation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [11] 袁 硕, 赵小山, 李帅威. 基于状态观测器的电力系统混沌控制 [J]. 天津职业技术师范大学学报, 2023, 33(3): 49–54.
- YUAN Shuo, ZHAO Xiaoshan, LI Shuaiwei. State Observer-Based Chaotic Control of Power Systems[J]. Journal of Tianjin University of Technology and Education, 2023, 33(3): 49–54.
- [12] 李书舟, 刘 斌. 脉冲控制在励磁电力系统中的应用研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2007, 21(2): 88–91.
- LI Shuzhou, LIU Bin. The Application Research of Impulsive Control in Excitation Power System[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2007, 21(2): 88–91.
- [13] 陆鹏飞, 王 悦, 石 恒, 等. 基于脉冲控制的航天器顺光抵近与顺光构型维持 [J]. 空间控制技术与应用, 2023, 49(3): 74–84.
- LU Pengfei, WANG Yue, SHI Heng, et al. Approach and Maintenance Along the Sunlight for Spacecraft Based on the Impulsive Control[J]. Aerospace Control and Application, 2023, 49(3): 74–84.
- [14] 戴清霞, 马米花. 通过脉冲控制实现机械臂系统的实用跟踪 [J]. 佳木斯大学学报 (自然科学版), 2021, 39(6): 111–115.
- DAI Qingxia, MA Mihua. Practical Tracking of Robotic Manipulator via Impulsive Control[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2021, 39(6): 111–115.
- [15] 高安安, 胡爱花, 江正仙. 事件触发脉冲控制多智能体系统的安全一致 [J]. 计算机应用, 2023, 43(1): 140–146.
- GAO An'an, HU Aihua, JIANG Zhengxian. Secure Consensus of Multi-Agent Systems Based on Event-Triggered Impulsive Control[J]. Journal of Computer Applications, 2023, 43(1): 140–146.
- [16] XIAO P, LIU B, TANG Q, et al. GKL-Finite-Time Stability via Comparison Principles for Stochastic Impulsive Systems[J]. Asian Journal of Control, 2024, 26(1): 126–136.
- [17] LIU B. Stability of Solutions for Stochastic Impulsive Systems via Comparison Approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(9): 2128–2133.
- [18] CLARKE F H, LEDYAEV Y S, STERN R J. Asymptotic Stability and Smooth Lyapunov Functions[J]. Journal of Differential Equations, 1998, 149(1): 69–114.

(责任编辑: 廖友媛)