基于积分-积分判据的电力设备 IOS 分析及应用实例

秦博宇,张雪敏,魏东宁
(清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室,北京 100084)

摘要:输入-状态稳定(ISS)理论可以通过子系统的稳定属性判断互联系统的稳定属性,尤其便于分析拓扑多变的独立电力系统稳定性,而如何得到设备的 ISS/输入-输出稳定(IOS)属性并使之具有较小保守性是其应用的前提。介绍了利用 L_∞ 范数表示的 ISS 定义式及其等价形式——积分-积分估计。考虑到电力系统中保护的反时限特性,提出利用积分-积分估计分析电力设备 ISS/IOS 属性,并以可运行区间为参考以应对不同互联结构下平衡点不唯一的问题。提出利用仿真测定子系统稳定属性的方法。通过 PSCAD 仿真软件利用 2 种等价形式对发电机与电动机子系统进行稳定属性分析,仿真结果证明了积分-积分估计更适合电力设备的 IOS 分析。

关键词:电力设备;输入-状态稳定;输入-输出稳定;积分-积分估计;输入-输出增益;稳定性
中图分类号:TM 712 **文献标识码**:A DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.001

0 引言

输入-状态稳定(ISS)理论是由 Eduardo D. Sontag 和 Yuan Wang 等学者提出的,将状态空间稳定理论与输入输出稳定理论结合起来。通过研究“分解”的子系统的稳定属性判断互联系统的稳定性[1],为网络的快速重构和紧急控制提供方便的稳定估计是该方法的重要优点。ISS 理论已经在编队控制[2]、化工过程分析[3]、模型简化[4]以及控制器设计[5-6]、航天器姿态控制[7]、计算机网络[8]等方面得到了应用,显示出了广阔的应用前景。

电力系统暂态稳定分析的基本方法可以分为 2 类,即时域仿真法和暂态能量函数法。电力系统的高维性和强非线性特性将导致时域仿真法的计算量大,耗时长。文献[9-10]将半张量积方法推广和应用于独立电力系统暂态稳定分析问题,通过多项式近似系统求出了独立电力系统的稳定域。然而独立电力系统具有网络拓扑多变、单个设备模型复杂、存在外部持续扰动等特点,只研究不含扰动、初值给定的系统的 Lyapunov 稳定性并不能满足实际工程要求。因此有必要引入 ISS 理论来分析独立电力系统的稳定性。

文献[11]指出利用 ISS 理论可通过子系统的稳定性判断互联后系统的稳定性,这对于独立电力系统的设计和运行具有重要意义。而如何得到设备的 ISS 属性是其基础。对于子系统 ISS 属性的分析,关键在于如何估计增益函数。在现有研究中,一般是通过人工观察法得到,这给该理论的应用带来了不便。文献[12]研究了局部 ISS 属性、局部 ISS-Lyapunov 函数以及局部小增益条件,该研究使得 ISS 理论更接近工程实际。文献[13-16]介绍了一种基于子系统数学模型分析 ISS 属性的算法,但由于实际系统难以精确建模,对于规模较大的系统难以降阶,数学模型不易考虑实际系统中的限幅环节等原因,该方法具有一定的保守性。文献[17]介绍了一种基于试验测定系统 L_2 增益的方法,其提出利用优化算法修正输入信号以减少量测噪声的影响。文献[18]给出了 ISS 理论的等价形式——积分-积分估计。对于一个 ISS 的子系统,可以用这 2 种等价的定义形式进行增益函数的估计,但目前尚无文献讨论哪种定义形式易于估计增益函数、哪种定义形式估计误差小。

本文首先介绍 ISS 的基本概念,给出基于积分-积分估计的 ISS 的等价定义式。为避免实际系统建模的复杂性,利用仿真分析子系统的 ISS 属性,根据实际物理系统选取几组典型的信号作为干扰输入,利用 PSCAD 仿真软件对发电机、电动机子系统的稳定属性进行估计。最后,通过仿真分析 L_∞ 范数形式和积分-积分估计形式的增益函数对于不同类型的输入信号的适应性。

1 ISS 基本概念

1.1 局部输入-状态稳定(LISS)和 LIOS 的 L_∞ 范数定义

首先介绍文中出现的 3 类函数的概念。

K 类函数:

$K:=\{\theta:R_0^+\rightarrow R_0^+|\text{连续,严格单增},\theta(0)=0\}$

$K_\infty:=\{\theta\in K|\text{无界}\}$

收稿日期:2013-06-04;**修回日期**:2014-02-25
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB228201);国家自然科学基金资助项目(50907038,51190103)
Project supported by the National Basic Research and Development Program of China(973 Program)(2013CB228201) and the National Natural Science Foundation of China(50907038,51190103)

$K_L:=\{\sigma:R_0^+\times R_0^+\to R_0^+|$连续,对一固定 $t\geqslant 0$,
$\sigma(\cdot,t)\in K$;对一固定 $s\geqslant 0$,$\sigma(s,\cdot)$随 $t\to\infty$,
严格衰减至 0$\}$

定义 1[14] 对系统

$$\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},u) \tag{1}$$

若存在$\beta^{ISS}\in K_L,\gamma^{ISS}\in K_\infty,\rho>0$,对任意$|\boldsymbol{x}_0|\leqslant\rho,\|u\|\leqslant\rho$有:

$$|\boldsymbol{x}(t,\boldsymbol{x}_0,u)|\leqslant\beta^{ISS}(|\boldsymbol{x}_0|,t)+\gamma^{ISS}(\|u\|)\quad\forall t\geqslant 0 \tag{2}$$

则称系统式(1)LISS。其中,$\boldsymbol{x}_0$为系统状态变量的初值;$\|u\|$为该系统的输入的无穷范数;γ^{ISS}为系统式(1)的输入-状态增益。

定义 2[14] 对系统

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{x}}&=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},u)\\ y&=h(\boldsymbol{x})\end{aligned} \tag{3}$$

若存在$\beta^{IOS}\in K_L,\gamma^{IOS}\in K_\infty,\rho>0$,对任意$|\boldsymbol{x}_0|\leqslant\rho$,$\|u\|\leqslant\rho$有:

$$|y(t,\boldsymbol{x}_0,u)|\leqslant\beta^{IOS}(|\boldsymbol{x}_0|,t)+\gamma^{IOS}(\|u\|)\quad\forall t\geqslant 0 \tag{4}$$

则称系统式(3)局部输入-输出稳定(LIOS)。其中,γ^{IOS}为系统式(3)的输入-输出增益。

1.2 积分-积分估计

文献[18]给出了 ISS 的等价形式,即积分-积分判据。

定义 3[18] 对于任何一个初始状态$\boldsymbol{x}_0$以及输入u,系统满足不等式

$$\int_0^t\alpha(|\boldsymbol{x}(s)|)\mathrm{d}s\leqslant\alpha_0(|\boldsymbol{x}_0|)+\int_0^t\gamma(|u(s)|)\mathrm{d}s \tag{5}$$

则称系统满足积分-积分估计。其中,$\alpha,\alpha_0,\gamma\in K_\infty$。

定理 1[18] 一个系统是 ISS 的当且仅当它满足积分-积分估计。

因此,可以用式(5)代替 ISS 的定义式,以积分能量衡量信号的大小。那么,子系统式(3)满足 LISS 和 LIOS 可表示为:存在$\alpha,\alpha_0,\gamma\in K_\infty,X_{\lim}>0,U_{\lim}>0$,对任意$|\boldsymbol{x}_0|\leqslant X_{\lim}$,$\int_0^t|\tilde{u}(s)|\mathrm{d}s\leqslant U_{\lim}$,有:

$$\begin{aligned}&\int_0^t\alpha(|\tilde{\boldsymbol{x}}(s)|)\mathrm{d}s\leqslant\alpha_0(|\boldsymbol{x}_0|)+\int_0^t\gamma(|\tilde{u}(s)|)\mathrm{d}s\\ &\int_0^t\alpha(|\tilde{y}(s)|)\mathrm{d}s\leqslant\alpha_0(|\boldsymbol{x}_0|)+\int_0^t\gamma(|\tilde{u}(s)|)\mathrm{d}s\end{aligned} \tag{6}$$

2 积分能量的计算

第 1 节介绍了 ISS 理论的等价形式(积分-积分估计),利用积分衡量输入与输出的大小,如何计算输入、输出的能量是关键所在。本节将对比 2 种积分能量的表达式:平衡点型积分能量函数、稳态运行区间型积分能量函数。

2.1 平衡点型积分能量函数

基于 Lyapunov 稳定理论的暂态稳定分析方法是系统安全分析和控制的重要基础。其以平衡点作为参考,实际工程中最关心的是当$t\to\infty$时,系统能否回到平衡点的稳定性,即$\lim\limits_{t\to\infty}\|\tilde{\boldsymbol{x}}(t)\|=0$,其中$\tilde{\boldsymbol{x}}(t)=\boldsymbol{x}(t)-\boldsymbol{x}_{eq}$,$\boldsymbol{x}_{eq}$为平衡点。类似地,可定义以下积分能量:

$$\int_0^t|\tilde{u}(s)|\mathrm{d}s=\int_0^t|u(s)-u_e|\mathrm{d}s$$

$$\int_0^t|\tilde{\boldsymbol{x}}(s)|\mathrm{d}s=\int_0^t|\boldsymbol{x}(s)-\boldsymbol{x}_e|\mathrm{d}s$$

$$\int_0^t|\tilde{y}(s)|\mathrm{d}s=\int_0^t|y(s)-y_e|\mathrm{d}s$$

其中,u_e、$\boldsymbol{x}_e$、y_e分别为子系统输入、状态变量以及输出的平衡点。

参考平衡点计算积分能量会带来以下问题:

a. 实际系统随着运行工况的变化,其平衡点也在不断变化,若给定每个子系统固定的平衡点,在互联条件改变时,平衡点的变化将导致积分趋于无穷;

b. 若希望计算得到子系统的准确平衡点,则需要知道互联系统的具体形式,进而根据互联系统求得子系统当前工况下的平衡点,如此 ISS 理论希望将子系统稳定性的分析与互联系统稳定性分析解耦的思路难以实施;

c. 实际系统稳态运行时,系统状态在平衡点处会出现小幅振荡,而不会严格等于平衡点的值,因此参考平衡点进行积分,在稳态情况下由于系统状态小幅振荡的缘故,积分能量会持续上涨,可能对计算结果有影响。

2.2 稳态运行区间型积分能量函数

基于第 2.1 节的分析,可以考虑改变计算积分的方式。实际系统运行中,经常利用反时限保护装置对系统的异常状态作出响应。国内外常用的反时限过电流保护的通用数学模型的基本形式为[19]:

$$t=\frac{k}{(I/I_p)^r-1} \tag{7}$$

其中,I为故障电流;I_p为保护启动电流;r为常数,取值通常在 0~2 之间;k为时间整定系数,单位为 s。

当$I<I_p$时,设备可以长时间连续运行;假设$r=1$,当$I>I_p$时,由式(7)可得$(I-I_p)t=kI_p$,等式右端为一常数,左端表示了过电流大小与时间成反比。如果考虑动态过程,可得到如下积分形式:

$$\int_0^{t_p}(I-I_p)\mathrm{d}t=kI_p \tag{8}$$

当$t=t_p$时,认为保护装置动作。

综上,实际保护装置存在一个稳态运行区间,系统状态变量在此区间内,系统可以连续运行,当变量偏离稳态运行区间时,偏离程度越大,则允许运行时间越短。这不仅反映了变量的幅值信息,还反映了变量持续时间长短带来的影响,因此可以利用积分来

近似这一过程。规定系统状态变量的稳态运行区间，若系统运行过程中某些状态变量超出稳态运行区间，则视为非正常状态，保护装置响应，即开始积分，该积分能量表示系统在非正常状态下的能量积累过程。例如，规定系统电压稳态运行区间为[0.9，1.1] p.u.，保护装置规定电压不得低于 0.7 p.u. 运行超过 10 s，此时积分能量为 $|0.7-0.9|\times 10=2$，该能量是系统的极限能量。当系统积分能量超过极限能量时，认为保护装置动作，此时系统不能稳定运行。

规定输入、状态、输出变量的稳态运行区间分别为 $[U_L,U_U]$、$[\boldsymbol{X}_L,\boldsymbol{X}_U]$、$[Y_L,Y_U]$，其中，下标 L、U 分别表示稳态运行区间的下界和上界。利用稳态运行区间作参考的积分能量分别定义如下：

$$\int_0^t |\tilde{u}(s)|\,\mathrm{d}s,\ \int_0^t |\tilde{\boldsymbol{x}}(s)|\,\mathrm{d}s,\ \int_0^t |\tilde{y}(s)|\,\mathrm{d}s$$

$$|\tilde{u}(s)|=\begin{cases}0 & U_L\leqslant u\leqslant U_U\\ |u-U_L| & u<U_L\\ |u-U_U| & u>U_U\end{cases}$$

$$|\tilde{\boldsymbol{x}}(s)|=\begin{cases}0 & \boldsymbol{X}_L\leqslant \boldsymbol{x}\leqslant \boldsymbol{X}_U\\ |\boldsymbol{x}-\boldsymbol{X}_L| & \boldsymbol{x}<\boldsymbol{X}_L\\ |\boldsymbol{x}-\boldsymbol{X}_U| & \boldsymbol{x}>\boldsymbol{X}_U\end{cases}$$

$$|\tilde{y}(s)|=\begin{cases}0 & Y_L\leqslant y\leqslant Y_U\\ |y-Y_L| & y<Y_L\\ |y-Y_U| & y>Y_U\end{cases}$$

3　子系统 LISS 和 LIOS 的估计方法

文献[17]中介绍了基于试验测定线性系统 L_2 增益的方法，利用线性系统的特殊性质，将求解使得增益最大的输入信号转化为求解一组优化问题。本文所研究的子系统具有强非线性，因此文献[17]中的方法并不完全适用，但其利用试验避免详细建模的思路是值得借鉴的。本节介绍一种基于 PSCAD 仿真实验的子系统增益函数的近似估计方法。

这里需要指出，本文考察的是使得子系统状态变量 $\boldsymbol{x}$ 和输出 y 都稳定的输入信号，在这样的条件下，子系统是 LISS 和 LIOS 的。由于互联系统的稳定分析不需要系统 LISS 的增益函数，以下仅介绍子系统 LIOS 增益函数的估计方法。

3.1　输入信号

本文考虑输入在一定范围内的 LISS 和 LIOS 问题。实际互联的独立电力系统中，一个子系统的输入是另一个子系统的输出，干扰主要来自与该子系统互联的其他子系统，因此考虑采用工频正弦波作为干扰输入。考虑到实际系统启动会伴随状态变量的冲激，根据包络线的不同，定义以下 4 种输入信号：

a. 矩形输入信号（干扰持续一段时间后回到平衡点）；

b. 矩形带冲激输入信号（矩形干扰持续时间内出现冲激）；

c. 阶跃输入信号；

d. 阶跃带冲激输入信号。

3.2　增益函数的估计方法

对子系统进行 ISS 属性分析，关键在于增益函数的估计。下面将根据 LISS 与 LIOS 的定义式，利用仿真方法对 L_∞ 范数定义形式与积分定义形式的 LIOS 增益函数进行讨论。

对于 L_∞ 范数定义式，需要估计 K_L 类函数 β 以及 K_∞ 类函数 γ；对于积分定义式，需要估计 K_∞ 类函数 α_0 和 γ。本文假定 β 是指数函数，α_0、γ 为线性函数，其函数表达式如下：

$$\beta(s,t)=K_\beta s\mathrm{e}^{-\lambda t}$$
$$\gamma(s)=K_\gamma s$$
$$\alpha_0(s)=K_\alpha s$$

利用仿真估计子系统增益函数的方法如下。

步骤 1　选择所研究子系统的状态变量 $\boldsymbol{x}$ 以及输出 y。

步骤 2　参考系统的保护配置，给定子系统可持续运行区间，并根据保护的整定值给出积分能量的上限值。

步骤 3　给定输入信号 u，固定系统的初始状态 $\boldsymbol{x}_0$，得到输出 y。

对于 L_∞ 范数定义情况，输出取稳态值，即 $t\to\infty$，此时 $\beta=0$，近似估计输入-输出增益：

$$\gamma\approx\frac{|y-y_e|_{t\to\infty}}{\|u-u_e\|}\tag{9}$$

对于积分定义形式，固定 $|\boldsymbol{x}_0|=0$，则此时 $\alpha_0=0$。近似估计输入-输出增益：

$$\gamma\approx\frac{\int_0^t|\tilde{y}(s)|\,\mathrm{d}s}{\int_0^t|\tilde{u}(s)|\,\mathrm{d}s}\tag{10}$$

步骤 4　改变输入的大小或采用不同形式的输入，用步骤 2 的方法计算输入-输出增益，可以得到一系列的 γ，从中取最大的 $\gamma_{\max}$ 近似子系统的输入-输出增益。若系统状态变量和输出的积分能量值超过上限值，那么认为此时系统失稳；逐步减小输入直至系统稳定，估计子系统输入信号的范围。

步骤 5　确定 $\gamma_{\max}$ 后，在规定的范围内改变系统的初值以及输入。对于 L_∞ 范数定义形式 $\beta(|\boldsymbol{x}_0|,t)\approx|y-y_e|-\gamma_{\max}\|u-u_e\|$，利用指数函数进行拟合，例如取最大值时的点以及末端的稳定点 2 个点进行拟合：时刻分别为 $t_{\max}$、t_{end}，幅值分别为 $\beta_{\max}$、β_{end}。可以得到：

$$\beta_{\max}=K|\boldsymbol{x}_0|\mathrm{e}^{-\lambda t_{\max}}$$
$$\beta_{\mathrm{end}}=K|\boldsymbol{x}_0|\mathrm{e}^{-\lambda t_{\mathrm{end}}}$$

从而可以计算得出函数的待定系数：

$$\lambda=\frac{\ln(y_{\max}/y_{\text{end}})}{t_{\text{end}}-t_{\max}}$$

$$K=\frac{y_{\max}}{|\boldsymbol{x}_0|}\mathrm{e}^{\lambda t_{\max}}$$

对于积分定义形式：

$$\alpha_0(|\boldsymbol{x}_0|)=\int_0^t|\tilde{y}(s)|\mathrm{d}s-\gamma_{\max}\int_0^t|\tilde{u}(s)|\mathrm{d}s$$

改变初值，可以得到不同的 α_0 函数，取其中最大的 α_0 作为估计。

4 发电机与电动机子系统仿真分析

前文介绍了 LISS 和 LIOS 的基本概念以及如何利用仿真估计子系统的增益函数。本节首先介绍独立系统典型设备发电机、电动机的仿真模型，通过对发电机和电动机子系统的仿真分析，比较 L_∞ 范数定义形式与积分定义形式的适用范围。

4.1 子系统仿真模型

本节通过 PSCAD 仿真计算发电机以及电动机的 LIOS 属性。利用仿真获取发电机及负载的 LIOS 属性，意味着要将发电机的负载虚拟成一个电流源，将负载的电源虚拟成一个电压源。如何合理地设置仿真环境是一个关键。下面就 PSCAD 仿真模型做简要说明。

a. 发电机以转速 ω、暂态电动势 E'_q 以及励磁和调速控制器的相关控制变量作为状态变量；电动机以转差率 s 作为状态变量。发电机子系统选取机端电压的标幺值作为输出，外加干扰电流源为输入；电动机子系统选取机端电流为输出，外加干扰电压源为输入。

b. 发电机子系统的状态变量初值 $\boldsymbol{x}_0$ 取自电阻负载切除之前，即发电机外接可控干扰电流源接入时的数值；电动机子系统的状态变量初值 $\boldsymbol{X}_0$ 取发电机切除之前，即电动机外接可控电压源接入时状态变量的稳态值。

c. 子系统外加干扰源的角频率始终与子系统的角频率相同(包括暂态过程)。在 PSCAD 中通过锁相环可以实现。这一处理是考虑实际系统中负载和电源的电压、电流量是同一频率，即以工频分量为主。

d. 规定发电机电压稳态运行区间为[0.9,1.1] p.u.，规定电动机电流可持续运行范围为[0,1] p.u.。

e. 此处规定保护整定为发电机机端电压不得低于 0.7 p.u. 运行超过 8 s，即发电机机端电压积分上限值为：

$$U_{\text{energy}}^{\max}=\int\left|\tilde{U}\right|\mathrm{d}t=0.2\times8=1.6$$

电动机电流不得高于 4 p.u. 运行超过 10 s，即电动机输出电流积分上限值为：

$$I_{\text{energy}}^{\max}=\int\left|\tilde{I}\right|\mathrm{d}t=3\times10=30$$

发电机的主要参数为：额定相电压 3.81 kV，额定相电流 1.05 kA，基准角频率 314.159 rad/s，$X_d=0.92$ p.u.，$X'_d=0.3$ p.u.。电动机的主要参数为：额定相电压 0.22 kV，额定相电流 3.2 kA。

4.2 发电机子系统输入-输出增益估计

分别利用阶跃、矩形、矩形带冲激信号作为输入，其输入电流有效值和输出电压有效值(标幺值)波形如图 1 所示，计算得到发电机子系统的输入-输出增益如表 1 所示。

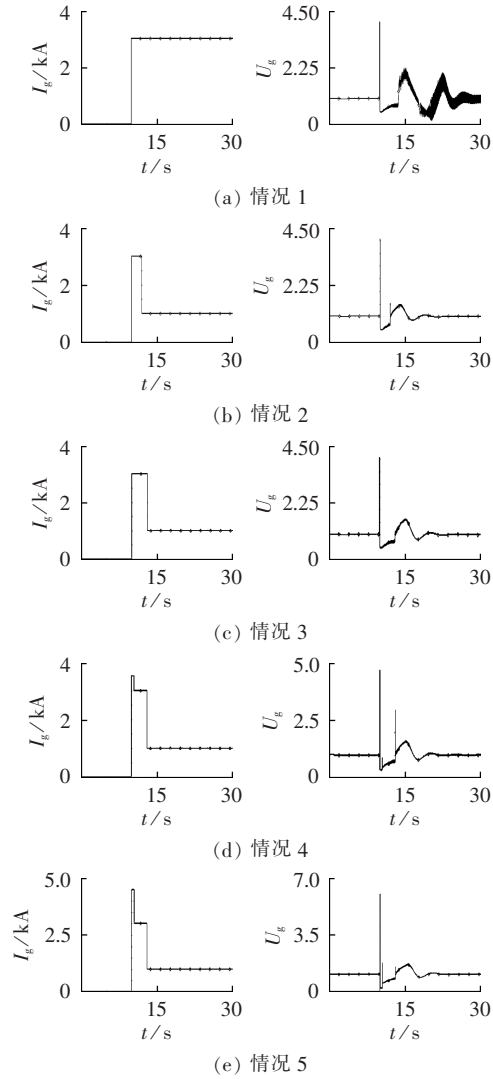


图 1 发电机子系统输入电流和输出电压波形

Fig.1 Input current and output voltage waveforms of generator subsystem

表 1 发电机子系统输入-输出增益

Tab.1 Input-to-output gain of generator subsystem

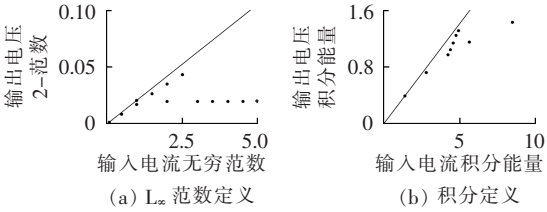
情况	增益		情况	增益	
	L_∞ 范数定义	积分定义		L_∞ 范数定义	积分定义
1	系统失稳	系统失稳	4	0.0057	0.2355
2	0.0500	0.2798	5	0.0044	0.2599
3	0.0500	0.2551			

表 1 中，用 L_∞ 范数定义形式计算出的输入-输出增益差异较大，利用积分-积分形式估计的输入-

输出增益差异较小。情况 1 的输入为阶跃信号，用 L_∞ 范数表示为 $\|u\|=3$ kA，仿真结果为系统振荡失稳。情况 2、3 利用矩形信号，幅值均为 3 kA，持续时间不同，用 L_∞ 范数表示为 $\|u\|=3$ kA，系统可以稳定运行，说明仅反映信号幅值信息是不够的。由于情况 2—5 的输入信号最终都回到平衡点附近，输出的稳态值也在平衡点附近，对于 L_∞ 范数定义形式根据式(9)计算输入-输出增益时利用输出的稳态值，因此输入-输出增益主要取决于输入的大小，情况 2、3 的矩形输入信号虽然持续时间不同，但幅值相同，用 L_∞ 范数衡量输入的大小相同，因此计算出的输入-输出增益相同；当输入带有冲激时，如情况 4、5，用 L_∞ 范数衡量输入的大小有较大差别时，会使得计算出的增益差别较大。

积分定义形式利用积分能量衡量输入、输出，对于信号的不同能有一个合理的反映，因此其计算的输入-输出增益也相对合理，从表 1 中可以看出，利用积分定义形式计算的输入-输出增益结果对于不同输入信号差别较小。

改变输入的波形，可以得到一系列输入与输出的曲线，如图 2 所示。本文利用线性函数拟合输入-输出增益，即图中直线。



(a) L_∞ 范数定义　　(b) 积分定义

图 2 发电机子系统输入、输出关系

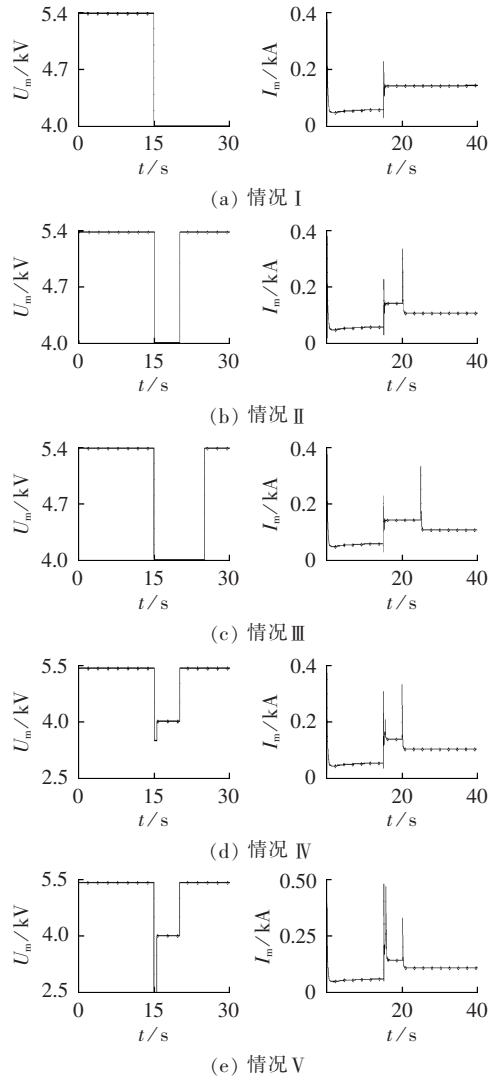
Fig.2 Relationship between input and output of generator subsystem

图 2(a)中，由于 L_∞ 范数定义形式仅能反映信号的幅值信息，对于不同的矩形输入信号，输出的大小基本不变；对于阶跃输入信号，由于干扰持续存在，不同的输入对应的输出也会有所不同，因此，图 2(b)中输入、输出分布较为离散。图 2(b)中，利用积分定义形式衡量的输入、输出分布均匀，且基本处于同一条直线上。利用线性函数拟合时，分布均匀的数据具有较小的保守性，进一步验证了表 1 反映的问题。

4.3　电动机子系统输入-输出增益估计

分别利用阶跃、矩形、矩形带冲激信号作为输入，其输入电压有效值和输出电流有效值(标幺值)波形如图 3 所示，计算得到电动机子系统的输入-输出增益如表 2 所示。

与表 1 类似，表 2 中 L_∞ 范数定义形式对于不同矩形以及矩形带冲激的输入信号，利用式(9)计算输入-输出增益时，对于输出的衡量基本相同，不能反映不同输入对于输出的影响，因此用 L_∞ 范数衡量输



(a) 情况Ⅰ　(b) 情况Ⅱ　(c) 情况Ⅲ　(d) 情况Ⅳ　(e) 情况Ⅴ

图 3 电动机子系统输入电压和输出电流波形

Fig.3 Input voltage and output current waveforms of motor subsystem

表 2 电动机子系统输入-输出增益

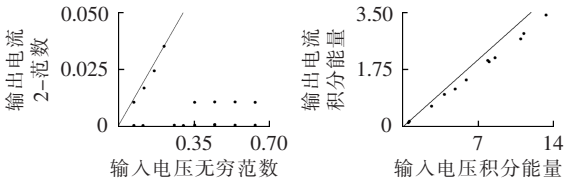
Tab.2 Input-to-output gain of motor subsystem

情况	增益		情况	增益	
	L_∞ 范数定义	积分定义		L_∞ 范数定义	积分定义
Ⅰ	0.1451	0.2460	Ⅳ	0.0009	0.2685
Ⅱ	0.0012	0.2579	Ⅴ	0.0006	0.3389
Ⅲ	0.0012	0.2459			

入大小有较大区别时，计算出的输入-输出增益也会有较大差距，见表 2 中情况Ⅱ—Ⅴ的结果。对于阶跃干扰信号，由于干扰持续存在，利用输出的稳态值可以反映输入信号的部分信息，因此 L_∞ 范数定义形式可以适应阶跃输入信号。

改变输入的幅值，可以得到一系列输入与输出的曲线，如图 4 所示。本文利用线性函数拟合输入-输出增益，即图中直线。

图 4(a)中，由于 L_∞ 范数定义形式仅能反映信号的幅值信息，对于不同的矩形及矩形带冲激的输入信号，输出的大小基本不变；而对于阶跃信号，其计



(a) L_∞ 范数定义　　(b) 积分定义

图4 电动机子系统输入、输出关系

Fig.4 Relationship between input and output of motor subsystem

算出的结果基本处于一条直线上,其对于不同输入信号适应性较差,因此计算出的点比较分散。图4(b)中,利用积分定义形式衡量的输入、输出分布均匀,且基本处于同一条直线上,进一步验证了表2反映的问题。

4.4 β 函数与 α_0 函数的估计

L_∞ 范数定义形式需要对 K_L 类函数 β 进行估计,由于函数 β 与初值和时间相关,增加了估计的难度。若利用指数函数进行拟合,考虑输入电流0.5 kA和1 kA这2种情况,用MATLAB画出仿真结果与拟合曲线见图5、图6。

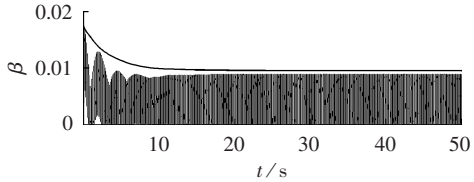


图5 输入电流为0.5 kA时的拟合曲线

Fig.5 Fitting curve when input current is 0.5 kA

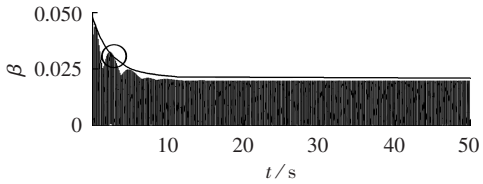


图6 输入电流为1 kA时的拟合曲线

Fig.6 Fitting curve when input current is 1 kA

由图5、图6可知,若拟合参数选取不合适,容易出现图6中拟合曲线并未完全包裹实际曲线的情况,使得ISS定义式无法满足。

而采用积分形式,需要估计 K_∞ 类函数 α_0,仅与初值相关,与 L_∞ 范数定义形式相比估计难度大幅降低。以发电机子系统为例,α_0 估计曲线见图7。

只需要取最大值进行估计即可,不会出现 L_∞ 范数形式定义中估计曲线无法包裹实际曲线的情况,因此利用积分-积分估计更便捷。

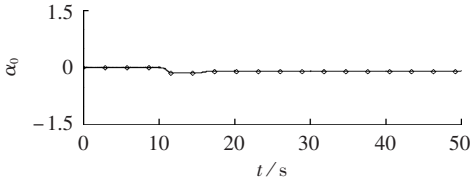


图7 α_0 的仿真曲线

Fig.7 Simulative curve of α_0 function

4.5 输入范围的估计

ISS理论另一个关键内容是求解子系统容许的输入范围。对于 L_∞ 范数定义形式,利用无穷范数衡量输入信号的大小;积分-积分定义形式则利用积分衡量输入信号的大小。下面以发电机子系统为例,分别用2种定义形式对输入范围进行估计。

对于 L_∞ 范数定义形式,利用阶跃信号作为输入,改变输入干扰电流幅值(1~2 kA),当输入干扰电流幅值为1.9 kA时,系统功率出现振荡,频率异常,因此输入范围 $\|u\|\approx 1.8$ kA。

对于积分定义形式,积分上限值如下:

$$U_{\text{energy}}^{\max}=\int\left|\tilde{U}\right|\mathrm{d}t<0.2\times 8=1.6$$

当系统输出积分能量超过极限能量时,认为保护装置动作,即系统不能稳定运行。

当 $\int_0^t\left|\tilde{u}(s)\right|\mathrm{d}s=14/\sqrt{2}$ 时,有:

$$\int_0^t\left|\tilde{y}(s)\right|\mathrm{d}s=1.945>U_{\text{energy}}^{\max}=1.6$$

此时超过了临界能量,因此输入范围近似取 $\int_0^t\left|\tilde{u}(s)\right|\mathrm{d}s=8.5$。

虽然2种方法均可求解系统的输入范围,但 L_∞ 范数定义形式利用无穷范数衡量输入大小,因此仅能反映输入信号幅值的信息,而不能反映干扰持续时间内输入信号整体的影响。换言之,对于 L_∞ 范数定义形式,只要输入信号的幅值相同,就认为其对于系统的影响是相同的,这显然是不符合实际系统情况的。因此,有必要引入积分-积分估计,对于干扰信号的度量有一个合理的表达。

综上可以得出 L_∞ 范数定义形式具有以下几点不足:

a. 采用 L_∞ 范数度量输入信号,仅能反映其幅值信息;

b. 与初值有关的函数 $\beta\in K_L$,是双变量函数,与初值和时间有关,不易拟合;

c. 从图2、图4可以看出,L_∞ 范数定义形式的输入与输出的关系和积分定义形式相比较为分散,对于不同类型的输入信号适应性较差,以其上界作为增益函数,将带来较大保守性。

积分定义形式基本弥补了 L_∞ 范数定义形式的不足,对于不同类型输入信号有较强的适应性,具有易于估计和保守性较小的优点。

5 结论与展望

本文结合电力设备保护的反时限特性,提出了

以稳态运行区间为参考的 ISS 等价形式，即积分-积分估计，该定义可以避免平衡点变化导致积分趋于无穷的问题，也使得子系统的 ISS 分析不依赖于互联系统的具体形式决定的平衡点，因此，更符合 ISS 理论的初衷。进一步，本文给出了一种基于仿真近似估计子系统增益函数的方法，该方法避免了建立微分方程数学模型及参数辨识等困难，且便于考虑实际设备中的限幅、保护等非线性环节。最后，根据实际工程中的干扰类型，选取了 4 种典型的信号组成干扰集，通过对发电机以及电动机子系统进行仿真，比较 L_∞ 范数定义形式与积分-积分估计。仿真结果表明积分-积分估计对于不同的输入具有较好的适应性，并且其增益函数 γ 和 α_0 均为 K_∞ 类函数，估计难度较低，效果优于 L_∞ 范数定义形式的估计。

需要指出，本文对于 K_∞ 类增益函数均利用线性函数进行拟合，如何改变增益函数估计的形式以进一步降低估计保守性有待进一步研究。此外，为了将以稳定运行区间为参考的积分-积分估计形式应用于工程系统稳定分析，还需研究相应形式的互联系统稳定定理，以便发挥其应用价值。

参考文献：

[1] SONTAG E D. Input to state stability: basic concepts and results[M]. Heidelberg, German: Springer Belin, 2008.

[2] CHEN Xingping, SERRANI A. Remarks on ISS and formation control[C]//Proceedings of 43rd IEEE Conference on Decision and Control. [S.l.]: IEEE, 2004: 177-182.

[3] POTRYKUS H G. An idempotent-analytic ISS small gain theorem with applications to complex process models[D]. Austin, USA: University of Texas at Austin, 2002.

[4] TEEL A R, MOREAU L, NESIC D. Input to state set stability for pulse width modulated control systems with disturbances[J]. Systems & Control Letters, 2004, 51(1): 23-32.

[5] MAZEAC F, SECPULCHRE R, JANKOVIC M. Lyapunov functions for stable cascades and applications to global stabilization [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(9): 1795-1800.

[6] ARACK M, TEEL A R, KOKOTOVIC P V. Robust nonlinear control of feedforward systems with unmodeled dynamics [J]. Automatica, 2001, 37: 256-272.

[7] HU Qinglei. Semi-globally input-to-state controller design for flexible spacecraft attitude stabilization under bounded disturbances[J]. Acta Astronautica, 2010, 66(3-4): 567-576.

[8] ALI M. Input-to-state stability in congestion control problem of computer networks with nonlinear links[J]. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2009, 5(8): 2091-2105.

[9] 梅生伟，刘锋，薛安成. 电力系统暂态分析中的半张量积方法[M]. 北京：清华大学出版社，2010：179-208.

[10] 孙玉娇，刘锋，梅生伟. 非线性系统的多项式近似表示及电力系统应用(Ⅰ)——理论篇[J]. 电机与控制学报，2010，14(8)：19-23，30.
SUN Yujiao, LIU Feng, MEI Shengwei. Polynomial approximation of a nonlinear system and its application to power system (I): theoretical justification[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(8): 19-23, 30.

[11] 张雪敏，陈来军，梅生伟. 输入状态稳定理论及其独立电力系统应用[J]. 电工电能新技术，2012，31(4)：58-61，70.
ZHANG Xuemin, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Input-to-output stability theory and its application on isolated power system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(4): 58-61, 70.

[12] DASHKOVSKIY S N, RUFFER B S, WIRTH F R. Numerical verification of local input-to-state stability for large networks [C]//Proceedings of 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2007: 4471-4476.

[13] WU Shengyu, MEI Shengwei, ZHANG Xuemin. Estimation of LISS(Local Input-to-State Stability) properties for nonlinear systems[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53: 909-917.

[14] WANG Guanqun, ZHANG Xuemin, MEI Shengwei, et al. Input-to-output stability analysis of interconnecting microgrids [C]// 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Weihai, China: [s.n.], 2011: 1097-1103.

[15] 伍声宇. 独立电力系统的 ISS 稳定性分析[D]. 北京：清华大学，2010.
WU Shengyu. ISS analysis of isolated power systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.

[16] WU Shengyu, ZHANG Xuemin, MEI Shengwei. Estimation of LISS properties via a quadratic form LISS-Lyapunov function [C]//ICROS-SICE International Joint Conference. Fukuoka, Japan: [s.n.], 2009: 1453-1458.

[17] BARENTHIN M, WAHLBERG B, HJALMARSSON H, et al. Data-driven methods for L_2-gain estimation[EB/OL]. [2013-06-04]. http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:471643/FULLTEXT01.pdf.

[18] SONTAG E D. Comments on integral variants of ISS[J]. Systems and Control Letters, 1998, 34(1-2): 93-100.

[19] BENMOUYAL G, MEISINGER M, BURNWORTH J. IEEE standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 868-872.

作者简介：

秦博宇

秦博宇(1989-)，男，陕西西安人，博士研究生，从事电力系统分析与控制方面的研究(**E-mail**：qinboyu11@126.com)；

张雪敏(1979-)，女，陕西大荔人，副教授，从事电力系统稳定与控制方面的研究；

魏东宁(1991-)，女，河北承德人，硕士研究生，从事电力系统稳定与控制方面的研究。

(下转第 12 页 continued on page 12)

excitation controller based on grey prediction control algorithm [J]. Power System Technology,2006,30(5):81-85.

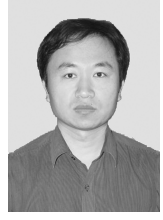
[13] 崔召辉,刘宪林,王明东,等. 灰色预测励磁控制同步发电机动态过程仿真[J]. 继电器,2007,35(6):34-37.
CUI Zhaohui,LIU Xianlin,WANG Mingdong,et al. Simulation of synchronous generator using grey prediction excitation control[J]. Relay,2007,35(6):34-37.

[14] LI Chienying,HUANG Tsongliang. Optimal design of the grey prediction PID controller for power system stabilizers by evolutionary programming[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Networking,Sensing & Control. Taipei,China:IEEE,2004:1370-1375.

[15] 王明东,刘宪林,于继来. 同步发电机可拓励磁控制器[J]. 电机与控制学报,2008,12(1):1-4.
WANG Mingdong,LIU Xianlin,YU Jilai. Extension excitation controller of synchronous generator[J]. Electric Machines and Control,2008,12(1):1-4.

[16] 王明东,刘宪林,于继来. 水轮发电机组调速系统的可拓控制[J]. 水力发电学报,2009,28(4):171-175,186.
WANG Mingdong,LIU Xianlin,YU Jilai. Extension-based control strategy for governor of hydro-generator[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2009,28(4):171-175,186.

作者简介:



王明东

王明东(1971-),男,河南濮阳人,副教授,博士,研究方向为电力系统稳定分析与控制、智能系统理论在电力系统中的应用(**E-mail**:wangmingdong@zzu.edu.cn);

刘宪林(1955-),男,河南洛阳人,教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、水电系统建模与分析;

于继来(1965-),男,江苏扬州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统模式分析、电力系统优化调度与运营、电力系统稳定分析与控制。

Power system stabilizer based on grey prediction and extension control

WANG Mingdong[1],LIU Xianlin[1],YU Jilai[2]

(1. School of Electrical Engineering,Zhengzhou University,Zhengzhou 450001,China;
2. Department of Electrical Engineering,Harbin Institute of Technology,Harbin 150001,China)

Abstract: As the applications of PSS(Power System Stabilizer) based on classic linear/nonlinear control in nonlinear and time-varying modern power system are really non-satisfying,the PSS based on grey prediction technology and extension control strategy is proposed,which combines the "prior control" of grey prediction and the real-time performance of extension control without precise mathematical model to effectively suppress low-frequency oscillation and improve system stability. The simulative results of a multi-machine system show that,compared with the traditional PSS or the PSS based on extension control,it has better control effect.

Key words: PSS; grey prediction; extension control; electric power systems; stability

(上接第 7 页 continued from page 7)

IOS analysis of electric power equipment based on integral-integral estimate and application examples

QIN Boyu,ZHANG Xuemin,WEI Dongning

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments,
Department of Electrical Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China)

Abstract: ISS(Input-to-State Stability) theory judges the stability of a system according to the stabilities of its interconnected subsystems,especially suitable for the stability analysis of an independent power system with variable topology,and to acquire the ISS/IOS(Input-to-Output Stability) property of equipment and make it less conservative is the prerequisites of its application. The definition of ISS represented as the L_∞ norm and its equivalence,the integral-integral estimate,are introduced. Because of the inverse time character of relaying protection devices,the integral-integral estimate is applied to analyze the ISS/IOS property of electric power equipment and the applicable range is used as reference to deal with the nonunique equilibrium point during topology change. It is proposed to estimate the ISS property of subsystem by simulation. Two equivalent methods are applied to estimate the ISS properties of generator and motor subsystems with PSCAD simulation software and results show the proposed integral-integral estimate is more suitable for the IOS analysis of electric power equipments.

Key words: electric power equipment; input-to-state stability; input-to-output stability; integral-integral estimate; input-to-output gain; stability