基于响应轨迹最大李雅普诺夫指数动态特征的 暂态稳定在线监测

黄 丹,孙华东,周勤勇,张 健,姜懿郎,张一驰 (中国电力科学研究院有限公司 电网安全与节能国家重点实验室,北京 100192)

摘要:基于非线性动态系统最大李雅普诺夫指数(LLE)稳定性判别理论,研究无需系统模型的电力系统暂态 功角稳定性在线监测方法。提出一种改进LLE估算法,并利用该方法分析发电机相对功角响应轨迹LLE的 典型动态特征及关键特性,在此基础上提出基于响应轨迹LLE动态特征的暂态稳定性监测方法。针对实际 中不完备的相量测量单元(PMU)配置问题,提出基于临界机组对的暂态稳定性在线监测方案,以节省计算成 本并加快稳定性监测。IEEE 10机39节点系统仿真结果验证了所提方案的有效性。

关键词:暂态稳定监测;最大李雅普诺夫指数;响应时间序列;临界机组对;广域信息

中图分类号:TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202004002

0 引言

大区域互联电网的飞速发展以及大规模间歇式 能源的接入^[1],对电力系统安全稳定控制系统提出 了更高的要求,暂态稳定控制方式正逐步转向"实时 决策,实时控制"模式^[2],有效的暂态稳定在线分析 方法是实现该模式的基础。传统暂态稳定分析方法 基于复杂的仿真计算,计算速度慢且其准确性依赖 于系统模型和参数的准确度。随着广域量测系统 (WAMS)在电力系统中的不断投入,实时获取全网 动态响应数据成为可能^[3],因此充分利用广域响应 信息,研究基于响应的暂态稳定在线监测方法对提 高电网安全稳定运行能力、实现"实时决策,实时控 制"具有重要意义。

目前基于响应的暂态稳定监测方法主要有轨迹 分析法^[4]、人工智能法^[5]以及最大李雅普诺夫指数 LLE(Largest Lyapunov Exponent)法^[69]。利用轨迹 分析法进行稳定性监测时,其结果常依赖于发电机 分群的结果且轨迹信息易受噪声的影响,因此有可 能造成误判。人工智能法没有考虑系统动态响应过 程的物理机理,并且计算时需要精确的学习样本,而 通过离线仿真很难提供与实际运行相匹配的大量有 效样本,因此人工智能法目前仍难以用于实际中。

利用LLE法进行暂态稳定性监测的依据是非线性动态系统LLE稳定性判别准则,即非线性系统的 LLE值可用来表征受扰后系统的动态稳定性,如果 系统的LLE是正数(负数),则系统相邻轨迹是分离 (聚合)的,因此系统是动态不稳定(稳定)的^[6]。

文献[6]最早对基于LLE的暂态稳定性监测原

收稿日期:2019-06-04;修回日期:2020-02-07 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777195) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777195) 理进行了证明,将窗口LLE的概念应用到电力系统 暂态混沌判别中,并通过LLE预测出电力系统是否 发生失步。文献[7]在此基础上进一步推导了LLE 与电力系统失步之间的关系,提出一种暂态稳定性 在线监测方案。文献[8]结合电力系统数学模型与 LLE 定义, 通过计算李雅普诺夫指数 LE(Lyapunov Exponent) 谱来监测系统的稳定性。上述方法均依 赖于系统模型,易受模型参数变化影响且需要高维 相空间重构,不利于实际电力系统的在线应用。对 此,文献[9]提出一种无需系统模型的LLE估算法, 通过求解系统所有发电机相对功角时间序列窗口的 LLE 值来监测系统的暂态功角稳定性,该算法仅需 进行简单的算术计算,计算速度快,可用于在线计 算。但是上述方法都需要根据LLE的最终符号特征 来判别暂态稳定性,所以需要寻找最优计算时间窗 口,而最优计算时间窗口取决于故障场景,难以确 定,并且此类方法往往需要较长的观测时间,故暂态 稳定性监测时间较长。

本文利用LLE稳定性判别原理与LLE直接估算 法求解机理深入分析发电机相对功角响应时间序列 LLE的动态特征与关键特性,并在此基础上提出基 于响应轨迹LLE动态特征的暂态稳定监测方法。针 对多机系统的暂态稳定性监测,提出基于临界机组 对的暂态稳定性在线监测方案,以提高稳定性监测 的快速性并节省计算成本。与传统LLE稳定性监测 方法相比,本文所提方法无需寻找最优时间窗口且 较大程度缩短了计算时间,并且准确性高,抗噪声能 力强,具有较大的工程应用价值。

1 LLE 定义及 LLE 稳定判别准则

LE是描述混沌动力学特征的重要统计特征量 之一,可用来判断非线性动态系统的运动行为。其 是指,在相空间中相邻的2条轨线随着时间变化按 指数规律分离或聚合的平均变化速率。

考虑N维连续时间动态系统: $\dot{x} = f(x), x \in X \subset \mathbf{R}^{N}$ 。令 $\varphi(t, x)$ 为系统微分方程在初始条件 $x = x_0 \top t$ 时刻的解。由Oseledec乘法遍历理论可定义如下极限^[6]:

$$\boldsymbol{\Lambda}(\boldsymbol{x}) = \lim_{t \to \infty} \left(\frac{\partial \boldsymbol{\varphi}^{\mathrm{T}}(t, \boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}} \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}(t, \boldsymbol{x})}{\partial \boldsymbol{x}} \right)^{\frac{1}{2t}}$$
(1)

令 $\Lambda_i(\mathbf{x})$ 为极限矩阵 $\Lambda(\mathbf{x})$ 的特征根,LE可定义为:

$$\boldsymbol{\lambda}_i(\boldsymbol{x}) = \lg \boldsymbol{\Lambda}_i(\boldsymbol{x}) \tag{2}$$

令 $\lambda_1(\mathbf{x}) \ge \lambda_2(\mathbf{x}) \ge \cdots \ge \lambda_N(\mathbf{x})$,将 $\lambda_1(\mathbf{x})$ 定义为LLE。

可根据LLE的符号特征对系统进行稳定性判别。基于LLE的稳定性判据可描述为:考虑一个连续时间动态系统,并假定该系统所有LE非零,如果系统的LLE是负数(正数),则系统相邻轨迹是聚合(分离)的,因此系统是动态稳定(不稳定)的。利用LLE符号特征判断系统稳定性的原理在文献[9]中已经得到证明。

2 功角响应时间序列的改进LLE估算法

2.1 LLE 求解机理

动态系统LLE的求解方法可归结为基于系统模型的分析法和无需系统模型的轨道跟踪法^[10]2种。前者建立在系统模型的基础上,需计算系统方程的 雅可比矩阵,进而求解LLE,这种方法依赖于系统模型的结构及参数,且计算复杂,因此不适合在线实现;后者直接从LLE的定义出发,通过跟踪动态系统两相邻轨迹对LLE进行直接估算,该方法无需反复 计算基于系统模型的雅可比矩阵,直接利用轨迹响应信息对LLE进行估计,因此更适用于电力系统暂态稳定分析的在线实现。

目前轨道跟踪法中常见的算法包括Wolf法、小数据量法和两点式直接估算法^[10]。其中,两点式直接估算法从非线性动态系统相空间中原邻近轨道间 对数欧氏距离的变化曲线出发,通过捕捉其变化过 程中呈现最为扩张趋势阶段的动态特性,利用两点 近似法对LLE进行求解。与其他2种轨道跟踪法相 比,其计算原理更加直观简单且易于实现。两点式 直接估算法的求取机理介绍如下^[11]。

将原非线性动态系统在状态空间中的轨迹设为 X(t),初始状态设为 $X_0, X(t)$ 最邻近轨迹的初始点表 示为 $X_{m(0)}$ 。选取原轨迹上某一点 X_q 为参考点,则原、 邻近时间序列轨迹之间的距离变化曲线可表示为:

$$L = \left\| \boldsymbol{X}_{m(q)+k} - \boldsymbol{X}_{q+k} \right\| \tag{3}$$

其中, X_{q+k} 和 $X_{m(q)+k}$ 分别为 X_q 和 $X_{m(q)}$ 之后的第k个点, $X_{m(q)}$ 为邻近轨迹上 X_q 的邻近点。

两相邻轨迹之间的对数欧氏距离曲线lgL的变 化可分3个阶段^[11],如图1所示。在阶段Ⅰ,两相邻 轨迹间距离波动比较大并逐渐趋向最为扩张的方 向,对应系统受扰后的初期阶段,该阶段受扰系统呈 现较强的非线性;在阶段Ⅱ,两相邻轨迹间的距离呈 现恒定指数增长规律且快速扩张,该阶段lgL曲线 近似为线性变化,将近似直线的斜率定义为LLE;在 阶段Ⅲ,两相邻轨迹间的距离经过阶段Ⅱ的快速变 化后逐渐趋于一个恒定的常数。



图1 非线性动态系统相空间中两相邻轨迹间 对数欧氏距离变化曲线



基于上述阶段 II 中LLE 的定义,利用两点式直接法近似求解得到系统在 $k\Delta t(\Delta t$ 为采样间隔)时刻的LLE 计算公式为^[11]:

$$\lambda_{1}(k\Delta t) \approx \frac{1}{k\Delta t} \lg \frac{D(X_{m(q)+k}, X_{q+k})}{D(X_{m(q)}, X_{q})} = \frac{1}{k\Delta t} \lg \frac{\left\|X_{m(q)+k} - X_{q+k}\right\|}{\left\|X_{m(q)} - X_{q}\right\|}$$
(4)

其中,D为两向量之间的欧氏距离。

2.2 改进的两点式直接法

由于上述两点式直接法求解LLE时只考虑了轨 迹上两点的信息,而忽略了点到点的过渡过程,这使 LLE的计算结果易受量测噪声的影响。因此,文献 [9]在此基础上研究了M个数据作为初始条件随时 间推移的演变轨迹,针对相对功角响应时间序列的 LLE计算,具体求解算法归结如下。

(1)从 WAMS 采集各发电机组的功角时间序列 数据,记为[$\theta_1(t), \theta_2(t), \dots, \theta_n(t)$]^T $\in \mathbb{R}^n$ 。其中,*n*为 发电机台数;*t*=0, Δt ,2 Δt ,…,*K* Δt ,*K*为各功角时间 序列的长度。以发电机*R*为参考机,发电机相对功 角记为 $\delta_i(t) = \theta_i(t) - \theta_R(t)(i=1,2,\dots,n \amalg i \neq R)$ 。

(2)从(1)中选取*M*个数据作为初始数据,满足 $\varepsilon_2 < |\delta_i(m\Delta t) - \delta_i((m-1)\Delta t)| < \varepsilon_1(m=1,2,\dots,M),$ 其中 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为2个给定的小数据,根据采样频率设 定,并满足 $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > 0_o$

(3)将 $\delta_i(t)$ 在 $k\Delta t$ 时刻的LLE定义为:

$$\begin{split} \lambda_{i}(k\Delta t) &\approx \\ \frac{1}{Mk\Delta t} \sum_{m=1}^{M} \lg \frac{D(\delta_{i}((k+m)\Delta t), \delta_{i}((k+m-1)\Delta t)))}{D(\delta_{i}(m\Delta t), \delta_{i}((m-1)\Delta t))} = \\ \frac{1}{Mk\Delta t} \sum_{m=1}^{M} \lg \frac{\left\| \delta_{i}((k+m)\Delta t) - \delta_{i}((k+m-1)\Delta t) \right\|}{\left\| \delta_{i}(m\Delta t) - \delta_{i}((m-1)\Delta t) \right\|} \end{split}$$
(5)

2.3 改进的欧几里得公式

在上述LLE的计算过程中,需计算两邻近点间 欧氏距离,假设 $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$ 、 $B = [b_1, b_2, \dots, b_n]^T$ 为相空间中2个不同的时间序列向量,二者之间的 欧氏距离可通过以下欧几里得公式得到:

$$D(\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left| a_{i} - b_{i} \right|^{2}}$$
(6)

由于实际中的时间序列数据往往受到压缩、伸展以及噪声等问题的影响,通过欧几里得公式计算得到的欧氏距离往往存在误差,从而导致LLE计算结果准确率降低。为克服上述缺陷,本文采用改进的欧几里得公式,通过引入平衡偏移量因子以进一步提高计算的准确性与抗噪声能力,具体的计算公式如下:

$$D^*(\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left| a_i - b_i - \boldsymbol{\gamma} \right|^2}$$
(7)

其中, $\gamma = \sum_{i=1}^{n} (a_i - b_i)^2$ 为平衡偏移量因子。

将式(5)中的欧氏距离替换为改进的欧几里得 公式(7),然后对LLE进行求解,最终可得到相对功 角响应时间序列的改进LLE估算法如式(8)所示。 $\lambda_i(k\Delta t) \approx$

$$\frac{1}{Mk\Delta t}\sum_{m=1}^{M} \lg \frac{D^*(\delta_i((k+m)\Delta t), \delta_i((k+m-1)\Delta t))}{D^*(\delta_i(m\Delta t), \delta_i((m-1)\Delta t))}$$
(8)

3 相对功角响应轨迹 LLE 的动态特征及关 键特性

3.1 相对功角响应轨迹LLE的动态特征

受扰后系统中发电机间的相对功角响应时间曲 线能直接反映出系统的稳定性^[12]。系统在遭受大的 扰动后其发电机相对功角曲线一般表现为2种稳定 情况:一种呈衰减振荡并最终趋于稳定,如图2中稳定 情况1曲线所示;另一种持续增大呈单摆失稳形 式,如图2中稳定情况2曲线所示。当故障后系统发 生小干扰不稳定或阻尼不足时,随着振荡过程中不 平衡能量的逐步累积,最终系统发生多摆失稳,发电 机间相对功角轨迹还会呈现第3种情况,如图2中稳 定情况3曲线所示。本文重点针对前2种稳定情况 的稳定性问题进行分析。



图 2 系统受扰后发电机相对功角响应时间曲线 Fig.2 Response curves of relative rotor angle of generators after power system disturbed

改进LLE估算法将LLE定义为对数欧氏距离曲 线从起始时刻开始的平均斜率,因此利用该方法得 到的发电机间相对功角LLE表征了发电机相对功角 的平均变化速率。同时由图2可知,受扰后的发电 机功角曲线表现出一定的动态特征,因此发电机间 相对功角LLE随时间的演变轨迹也会呈现一定规律 的动态特征。

以IEEE 10机 39节点系统发生三相接地短路故障为例,对发电机相对功角响应时间序列的LLE-*t*曲线特征进行详细分析,该标准测试系统的详细参数见文献[13]。设置bus₄-bus₁₄间输电线0时刻首端发生三相接地短路,故障切除时刻分别设为0.12 s和0.26 s,分别对应稳定算例和失稳算例。以G₃₉作为参考机为例,分别对稳定算例和失稳算例中的发电机间相对功角的LLE-*t*曲线进行计算,仿真中故障时刻为计算初始时刻,数据采样间隔 Δt =10 ms, 两算例的仿真结果分别如图3和图4所示。



由图3可知:稳定情况下发电机间相对功角曲 线均呈衰减振荡并最终趋于稳定;相应地,所有 LLE-t曲线均先急剧降低,然后呈衰减振荡趋势,最 后近似趋于一个负的常数。由图4可知:失稳情况 下发电机间相对功角曲线均呈单摆失稳;相应地,所有 LLE-t 曲线先剧烈波动,然后逐渐降低至一个正的常数。

综合上述分析,可将发电机间相对功角响应时 间序列的LLE-t曲线的动态特征归结为3个变化 阶段。

(1)初始阶段,LLE-t曲线发生较大波动且波动 时间很短。

(2)第二阶段,LLE-t曲线呈现一定的变化规律,且不同的稳定情况呈现出不同的变化特征:整体上,稳定情况呈现衰减振荡特征,失稳情况呈现持续下降趋势,并且该阶段过程较长。

(3)第三阶段,LLE-t曲线逐渐趋于平稳,在稳 定情况下逐渐趋于恒定负数,在失稳情况下逐渐趋 于恒定正数。

3.2 相对功角响应轨迹LLE的关键特性

为进一步分析初始采样数据对LLE-t曲线最终 变化趋势的影响,分别设置初始采样数据数M=10及 M=100对上述两算例进行仿真计算,以发电机组对 G₃₀-G₃₉为例,其相对功角响应时间序列的LLE-t曲 线如图5所示。由图可知,初始采样数据数大小对 LLE-t曲线最终趋势没有影响,因此无论初始数据 如何选择,稳定情况下LLE-t曲线最终趋于负值,失 稳情况下LLE-t曲线最终趋于正值。







综合上述分析可知,发电机相对功角响应轨迹的LLE-t曲线的第二阶段及第三阶段在不同稳定情况下呈现不同的动态特征,另外,其最终变化趋势只与响应轨迹的稳定情况有关。因此,在进行基于LLE的暂态稳定性监测时,无需持续观察LLE-t曲线的最终符号特征,可根据监测LLE-t曲线在第二阶段的动态特征对系统的暂态稳定性进行快速监测。

4 基于临界机组对的多机系统暂态稳定性 监测

电力系统在发生故障后总会存在1台或数台局 部受扰最严重以及受扰最小的发电机组,将故障后 系统受扰最严重的发电机与受扰最小的发电机组成 受扰最严重机组对,并将其定义为临界机组对,其动 态响应过程可直接反映出整个系统的暂态稳定 性^[14]。受经济成本与技术条件限制,实际中不可能 所有发电机节点都配备广域测量装置,因此可利用 WAMS中关键布点相量测量单元(PMU)提供的发电 机相关特征量响应信息捕捉故障后系统中受扰最严 重的一对机组,对该机组对的相对功角时间序列进 行基于响应轨迹LLE的暂态稳定性监测,以实现对 多机系统的暂态稳定性监测。如果该临界机组对相 对功角稳定,则系统是稳定的;如果该临界机组对相 对功角失稳,则系统是稳定的;如果该临界机组对相 对功角失稳,则系统是失稳的^[15]。最严重受扰临界 机组对的选择可参照文献[16]。基于临界机组对的 多机系统暂态稳定在线监测方案流程图如图6所 示,该方案无需进行机群划分和等值,并且无需对系 统中所有的机组对进行监测,因此可减少计算成本 并加快稳定性的监测。



图6 多机系统暂态稳定在线监测方案流程图

Fig.6 Flowchart of online monitoring for transient stability of multi-generator system

5 算例分析

采用暂态稳定仿真计算工具(BPA)对 IEEE 10 机 39节点系统^[13]算例进行仿真,将仿真得到的扰动 响应数据模拟WAMS实时量测数据。以Δ*t*=10 ms、 *M*=10为例进行暂态稳定性监测仿真计算,仿真时间 设为 20 s,发电机相对功角响应轨迹的 LLE 估算法 与临界机组对识别程序均利用MATLAB编程实现。

5.1 稳定算例

设置 bus₂₆-bus₂₉间输电线 0 时刻首端发生三相 短路,故障切除时刻设为 0.1 s,系统稳定,此故障场 景下的临界机组对为 G₃₈-G₃₉。对 G₃₈-G₃₉进行基于 响应轨迹 LLE 动态特征的稳定性监测, 仿真结果如 图 7 所示。为了验证所提改进 LLE 估算法的计算 效果,与文献[9]中原算法进行对比仿真,结果如图 7(c)所示。

由图7(b)可知,G₃₈-G₃₉间相对功角振荡周期大





图7 稳定情况仿真结果

Fig.7 Simulative results of stable case

约为2s;同时由图7(c)中改进LLE估算法的计算结 果可知,LLE-t曲线经过初始阶段较大波动后迅速 进入第二阶段呈现衰减振荡特征,随后近似趋于恒 定负数,LLE大约经过1~3s衰减振荡后均下降至0 以下,因此可在发电机相对功角刚经过一摆振荡时 监测出系统暂态稳定。另外由图7(c)中2种算法得 到的LLE-t曲线对比可知,利用所提改进算法得到 的LLE结果在准确性和快速性方面明显优于原算 法,如果采用原算法进行暂态稳定性监测,至少要监 测4~5s之后的LLE值。

5.2 失稳算例

52

设置 bus₂₆-bus₂₉间输电线 0 时刻首端发生三相 短路,故障切除时刻设为 0.18 s,系统发生暂态失稳, 该失稳场景下的临界机组对为 G₃₈-G₃₉。对该机组对 进行暂态稳定性监测,仿真结果如图 8 所示。

由图 8(c)可知,LLE-t曲线经过初始阶段的较 大波动后很快呈现持续下降趋势,且随后趋于恒定正 数,整个变化过程中利用所提改进算法得到的 LLE 值一直大于0,利用所得 LLE-t曲线可大致在 1~2 s 后监测出系统发生暂态失稳。进一步由图 8(c)中2 种算法得到的 LLE-t 对比曲线可知,改进 LLE 估算



图8 失稳情况仿真结果

Fig.8 Simulative results of unstable case

法比原算法得到的计算结果能够更加准确地表征系统的失稳状态。

5.3 讨论

(1)噪声量测测试。

从实际测量装置中获取的时间序列数据会存在 一定的噪声,为验证所提方法的抗噪声能力,对上述 两算例分别进行噪声量测测试。实际中商用PMU 的量测信噪比 SNR(Signal Noise Ratio)基本大于 100 dB,即测量误差小于1%^[17]。对上述两算例中 G₃₈-G₃₉原相对功角时间序列数据加入 SNR 为40 dB 的高斯噪声(测量误差为2.5%)来模拟实际 PMU测 量噪声,测试结果如图9所示。

由图9可知,对两算例添加噪声以后计算得到的LLE-t曲线动态特征均不变,噪声对系统稳定性监测的准确性没有影响,且对监测时间范围的影响很小。可见所提方法具有较强的抗噪声能力,即使测量装置存在SNR为40dB的噪声,仍然能很好地监测出系统的稳定性。

(2)计算时间窗口。

利用所提方法对系统暂态稳定性进行监测时需 预先设定有限时间的数据窗长。理论上,该数据窗





长趋于无穷大时才代表系统的LLE,但由于实际计 算条件以及测量装置传送速率的限制,不可能实现 无穷大时间数据窗长的计算。当计算数据窗长选取 过短时,不充足的时间序列计算会降低稳定性预测 的准确性,而选取过长时会延长系统稳定性监测的 时间,因此合理计算数据窗长是实现稳定性有效监 测的关键。

由第3节可知,发电机相对功角响应轨迹的 LLE-t曲线经过短暂的第一阶段剧烈波动后很快进 入第二阶段,该阶段不同稳定情况的响应轨迹呈现 不同的LLE-t曲线特征,此外,LLE-t曲线进入第三 阶段的最终变化趋势只取决于轨迹的稳定形式,因 此在实际中进行暂态稳定性监测时,如果因计算数 据窗口限制无法明确得到LLE-t曲线的最终趋势, 可根据第二阶段动态特征进行快速监测。另外,多 机系统暂态稳定性监测方案基于临界机组对实现, 因此可进一步缩短计算时间窗口。为防止暂态稳定 性监测发生误判并考虑稳定性监测的快速性,经大 量仿真测试后本文将计算数据窗口设为5s。

为了验证上述计算数据窗口的有效性,同时为 进一步验证所提暂态稳定监测方案的有效性,对 IEEE 10机39节点系统扩大故障测试范围。设置系 统中每一个母线节点以及母线间连接线路0时刻发 生三相短路故障,故障清除时间分别设为0.08、 0.16、0.24、0.32 s,采样间隔为Δt=10 ms,计算时间为 5 s。对共计252个算例进行暂态稳定性监测仿真测 试,结果如表1所示,其中t。为故障清除时间。

表1中结果表明,利用所提暂态稳定性监测方

表1 IEEE 10机 39节点系统故障测试结射	ŧ
--------------------------	---

Table 1	Test	results	of	faults	in	IEEE	10-generator		
20 hug graters									

57-bus system							
$t_{\rm c}/{\rm s}$	算例	数量	暂态稳定性监测				
	稳定情况	失稳情况	准确率 / %				
0.08	63	0	100				
0.16	52	11	100				
0.24	27	36	100				
0.32	6	57	100				
共计	148	104	100				

案可以有效监测出系统的暂态稳定性。所有算例中 仅根据5s的LLE-t曲线特征就能准确监测出系统 的稳定性,克服了传统LLE稳定性监测法寻找最优 时间窗口的困难^[79],较大程度缩短了计算时间。另 外,所有算例计算5sLLE值平均耗时为0.026ms,且 计算程序所需总耗时不超过0.086ms,满足暂态稳 定监测在线要求。

(3)初值的选取对稳定性监测结果的影响。

利用本文方法进行暂态稳定性监测时需设置固定的初始值长度,即需要确定M的取值。为研究不同初值对所提方法的影响,以上述两算例为例,进行不同初值的仿真。仿真中,采样间隔均为Δt=10 ms, 仿真结果如图10所示。由图中可看出,M的选取主要影响LLE-t曲线在第一阶段变化时间的长短,而对LLE-t曲线在第一阶段变化时间的长短,而对LLE-t曲线在第二阶段的典型动态特征并无影响,并且M的大小对LLE-t曲线的最终演变值影响很小,即对LLE计算的准确性影响很小。因此,M的选取对利用本文方法得到的稳定性监测结果没有较大影响。但是M取值太大时会导致计算等待时间增加并且可能会导致LLE-t曲线不经过第一、二阶段变化,直接进入第三阶段。因此,根据大量仿真计算, 建议M取10~20,即取初始值窗长为100~200 ms。



图 10 2种算例下 G_{38} - G_{39} 相对功角LLE-t曲线 Fig.10 LLE-t curves of relative rotor angle between G_{38} and G_{39} for two cases

6 结论

本文从非线性动态系统的角度出发,提出一种 基于响应轨迹 LLE 的电力系统暂态稳定性在线监测 方法,并提出改进 LLE 估算法。利用 IEEE 10机 39 节点系统算例验证了所提方法的正确性和有效性。 仿真中对所提改进 LLE 估算法与原算法进行对比研 究,结果表明改进 LLE 估算法在准确性和快速性方 面均明显优于原算法;噪声量测测试结果表明改进 LLE 估算法具有较强的抗噪声能力。另外,根据故 障遍历测试结果得出,将计算时间窗口设为5 s既能 保证暂态稳定性监测结果的准确性,又能兼顾计算 的实时性,克服了传统 LLE 稳定性监测方法寻找最 优时间窗口的困难,较大程度缩短了计算时间。本 文方法无需系统模型,不受系统模型结构和参数的 影响,且简单快速,适合大规模系统的暂态稳定性在 线分析。

本文方法作为一种暂态稳定性在线监测方法, 可用于安全稳定控制的校核。下一步研究工作的重 点是将基于LLE的稳定性监测原理与电力系统的暂 态稳定物理机理相结合,研究一种暂态稳定性快速 判别方法以用于安全稳定控制决策。

参考文献:

[1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统 的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904, 2205.

ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7):1893-1904, 2205.

[2] 赵晋泉,邓晖,徐光虎,等. 基于区间联络线能量预测的暂态稳 定紧急切机控制(二)工程案例[J]. 电力自动化设备,2016,36 (10):108-112,120.

ZHAO Jinquan, DENG Hui, XU Guanghu, et al. Transient stability emergency generator tripping control based on tie-line energy prediction part two:project case[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10):108-112, 120.

[3] 杨松浩,王怀远,苏福,等. 基于相轨迹凹凸性的暂态不稳定性 判别方法的分析比较[J]. 电力自动化设备,2017,37(9): 193-198.

YANG Songhao, WANG Huaiyuan, SU Fu, et al. Analysis and comparison of transient instability detection methods based on convexity and concavity of phase trajectory [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 193-198.

[4] 岑炳成,唐飞,廖清芬,等.应用功角空间降维变换的相轨迹判 别系统暂态稳定性[J].中国电机工程学报,2015,35(11): 2726-2734,后插11.

CEN Bingcheng,TANG Fei,LIAO Qingfen,et al. Transient stability detection using phase trajectory obtained by dimension reduction transform of power angles[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(11):2726-2734,后插11.

 [5]张晨宇,王慧芳,叶晓君.基于XGBoost算法的电力系统暂态 稳定评估[J].电力自动化设备,2019,39(3):77-83,89.
 ZHANG Chenyu, WANG Huifang, YE Xiaojun. Transient stability assessment of power system based on XGBoost algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 77-83,89.

- [6] LIU C W, THORP J S, LU J, et al. Detection of transiently chaotic swings in power systems using real-time phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3):1285-1292.
- [7] YAN J,LIU C C,VAIDYA U. PMU-based monitoring of rotor angle dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4):2125-2133.
- [8] WADDUWAGE D P, WU C Q, ANNAKKAGE U D. Power system transient stability analysis via the concept of Lyapunov exponents[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 104: 183-192.
- [9] DASGUPTA S, PARAMASIVAM M, VAIDYA U, et al. PMUbased model-free approach for real-time rotor angle monitoring [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5):2818-2819.
- [10] PEIXOTO M L C, NEPOMUCENO E G, MARTINS S A M, et al. Computation of the largest positive Lyapunov exponent using rounding mode and recursive least square algorithm[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2018, 112:36-43.
- [11] PARLITZ U. Estimating Lyapunov exponents from time series [M] //Chaos Detection and Predictability. Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2016; 1-34.
- [12] 吴为,汤涌,孙华东,等. 暂态稳定受扰轨迹预测的模型参数自适应研究[J]. 电网技术,2013,37(3):827-834.
 WU Wei,TANG Yong,SUN Huadong, et al. Research on self-adaption of model parameters for prediction of disturbed trajectories in transient stability analysis[J]. Power System Technology,2013,37(3):827-834.
- [13] LEZAM GRAMON F. Prediction and control of transient instability using wide area phasor measurements [D]. Winnipeg, Canada: University of Manitoba, 2011.
- [14] HAQUE M H. Further developments of the equal-area criterion for multimachine power systems [J]. Electric Power Systems Research, 1995, 33(3):175-183.
- [15] HAQUE M H, RAHIM A H M A. Determination of first swing stability limit of multimachine power systems through Taylor series expansions[J]. IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution, 1989, 136(6):373.
- [16] 卢芳,于继来.基于广域相量测量的暂态稳定快速评估方法
 [J].电力系统自动化,2010,34(8):24-28.
 LU Fang, YU Jilai. WAMS based power system transient stability assessment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010,34(8):24-28.
- [17] DASGUPTA S, PARAMASIVAM M, VAIDYA U, et al. Realtime monitoring of short-term voltage stability using PMU data
 [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3702-3711.

作者简介:



黄 丹(1987—),女,山东菏泽人,博 士后,博士,研究方向为电力系统暂态稳定 控制、高比例可再生能源电力系统分析 (**E-mail**:meetzl@163.com);

孙华东(1975—),男,山东潍坊人,教 授级高级工程师,博士研究生导师,博士,研 究方向为电力系统稳定与控制(E-mail: sunhd@epri.sgcc.com.cn)。

周勤勇(1977—),男,江苏苏州人,教 授级高级工程师,博士,研究方向为电网规划技术(E-mail: qyzhou@epri.sgcc.com.cn)。

(编辑 王锦秀)

Online monitoring of transient stability based on largest Lyapunov exponent dynamic characteristics of response trajectory

HUANG Dan, SUN Huadong, ZHOU Qinyong, ZHANG Jian, JIANG Yilang, ZHANG Yichi

(State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation, China Electric Power Research Institute,

Beijing 100192, China)

Abstract: On the basis of stability criterion theory of LLE(Largest Lyapunov Exponent) in nonlinear dynamic system, the online monitoring method of system model-free transient rotor angle stability is researched. An improved LLE estimation method is proposed, which is adopted to analyze the dynamic characteristics and key features of LLE of the relative rotor angle response trajectory. On this basis, a transient stability monitoring method based on the LLE dynamic characteristics of response trajectory is proposed. Aiming at the practical problem of incomplete PMU (Phasor Measurement Unit) placement, an online transient stability monitoring scheme based on the critical generator pair is proposed to reduce the computational cost and speed up the stability monitoring. The simulative results of IEEE 10-generator 39-bus system verify the effectiveness of the proposed scheme.

Key words: transient stability monitoring; largest Lyapunov exponent; response time series; critical generator pair; wide-area information

(上接第24页 continued from page 24)

Influence mechanism of single-phase tripping on commutation process and suppression strategy of continuous commutation failure

ZHAO Sheng, LI Botong, LI Bin, YAO Bin

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The phase characteristics of the voltage at the converter busbar after the single-phase tripping of inverter-side AC system due to the grounding fault are studied. The theoretical analysis shows that cutting the fault phase of AC system will change the phase difference of the inverter commutation voltage. On this basis, the inverter commutation process after single-phase tripping is analyzed, which shows that under the existing equal interval triggering mode, the commutation process of the DC system will be affected, and there is even the risk of commutation failure. Therefore, a commutation failure judgment method based on the amount of trigger angle deviation is proposed, which can reliably determine whether the single-phase tripping under the current system parameters will cause continuous commutation failure. Based on the phase difference of the commutation voltage, an inverter triggering method suitable for the single-phase tripping of inverter-side AC system is proposed to suppress the commutation failure. The results of PSCAD simulation show that the proposed commutation failure judging method can reliably predict the commutation failure caused by single-phase tripping, and the proposed converter triggering mode can effectively suppress the continuous commutation failure.

Key words: HVDC power transmission; single-phase tripping; trigger angle deviation; converter triggering mode; continuous commutation failure; suppression method