

基于实测响应轨迹稳定边界的电力系统 暂态不稳定识别*

李欣然¹, 韦肖燕^{1†}, 范力泉², 钱军³, 宋军英³

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 国网湖南省电力公司 检修公司, 湖南 长沙 410004; 3. 湖南电力调度通信中心, 湖南 长沙 410007)

摘要:为充分利用广域测量系统 WAMS(wide area measurement system)信息实现电力系统暂态稳定性快速在线识别,提出一种基于实测响应轨迹稳定边界的暂态不稳定识别方法.根据单机"位能脊"推导了单机-无穷大系统在相平面上的暂态稳定边界;证明单机无穷大系统任意比例剖分点处,由扰动能与电压相角构成的平面上的轨迹与相平面轨迹具有相似的几何特征,为间接利用发电机端口外网络测量信息识别电力系统暂态不稳定性提供了依据;证明了临界机组对的相轨迹上二阶导数等于零的点构成了系统的不返回边界,提出用临界机组对的相轨迹几何特征来识别系统暂态稳定性.为避免判据在线应用时受参数及不确定性干扰可能造成误判,对判据进行了实用性改进.利用 PSASP 6.28 WEPRI 36 节点仿真算例验证了所提判据的有效性.

关键词:单机位能脊;相平面;扰动能;不返回边界;临界机组对相轨迹

中图分类号:TM712

文献标志码:A

Transient Instability Detection of Power System Based on Stable Boundary of Actual Measurement Response Trajectory

LI Xinran¹, WEI Xiaoyan^{1†}, FAN Liquan², QIAN Jun³, SONG Junying³

(1. College of Electric and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. State Grid Hunan Maintenance Company, Changsha 410004, China;

3. Hunan Electric Power Dispatch and Communication Center, Changsha 410007, China)

Abstract: In order to make full use of the information of wide area measurement system (WAMS) to rapidly identify the transient instability online, this study proposed a transient instability detection method based on stable boundary of actual measured response trajectory. The authors deduced the transient stable boundary condition on the phase portrait of OMIB system according to the ridge of one machine infinite bus (OMIB) system. It is found that the trajectory of disturbance energy versus voltage phase angle is geometrically similar with the phase trajectory at arbitrary point of OMIB system. The measured information outside generator bus can be used for identifying transient instability. Meanwhile, the points with zero second

* 收稿日期:2016-05-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477043), National Natural Science Foundation of China (51477043);湖南省科技重大专项(2016GK1003), Hunan Province Department of Major Projects(2016GK1003)

作者简介:李欣然(1957-),男,湖南涟源人,湖南大学教授,博士研究生导师

† 通讯联系人, E-mail: xiaoyan.wei@sohu.com

derivative form a no-returning boundary on the phase trajectory of critical unit pair, which shows that the geometrical feature can be used for identifying the transient stability. The authors also gave a checkout of the availability by the simulation test of PSASP6.28 WEPRI 36 bus system.

Key words: ridge of single generating unit; phase portrait; disturbance energy; no-returning boundary; phase trajectory of critical unit pair

随着电网以及电力市场的日益发展,电网运行状态越来越接近临界状态,这给电网的安全稳定运行带来了一定的隐患,暂态稳定问题也更加突出^[1]. 缺乏有效的电网在线稳定分析方法和相应的控制策略是错失最佳控制时机,引发停电事故的重要原因之一^[2]. 因此快速、准确地识别出电力系统暂态不稳定对电力系统安全稳定运行显得尤为重要^[3-4].

目前,电力系统暂态稳定分析主要采取的分析方法有时域仿真法和能量函数法^[5-7]. 时域仿真法首先基于元件数学模型进行离线数值计算获取机组的摇摆曲线,然后通过两机功角的相对值与阈值的比较来判别系统稳定性. 但在确定系统故障的临界切除时间时必须进行反复试凑,需要较长的计算时间,难以应用于在线稳定分析^[8]. 基于暂态能量的方法能计及非线性、适应较大系统、计算速度快,并能给出稳定度,但是该方法在多机条件下的应用受到限制^[9]. 随着电网日趋复杂,传统的电力系统稳定性分析已经不能满足安全稳定运行的要求^[10].

全球同步卫星定位系统(global positioning system, GPS)与相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)问世以来,在电力系统的广域范围内实现了发电机功角和母线电压相量的实时监测^[11]. 基于WAMS数据的电力系统暂态在线判稳方法获得了诸多成果. 文献[2]提出了一种通过转速差和相对功角差变化趋势实时辨识电网暂态稳定性的方法,但采用抛物线拟合受采样区段影响较大. 文献[9]在支路势能函数和势能脊方法的基础上,推导了能够用于暂态稳定和临界割集识别的支路势能脊判据. 但支路数量较多时计算量大. 受系统参数及量测噪声的影响,上述基于轨迹信息的方法在实际工程中易发生误判. 文献[8, 12-13]利用故障后的实测信息构造系统特征向量,通过机器学习技术来建立系统特征与稳定结果之间的映射关系,但此类方法受到机器学习复杂度和计算精度的制约.

本文从“位能脊”概念出发,研究利用发电机并网联络线 WAMS 有效量测数据的暂态稳定性识别方法. 基于单机无穷大系统“位能脊”的不稳定平衡点时域判据,推导出 ω - δ 相平面的暂态稳定边界条件;定义发电机并网联络线任意剖分点处的扰动能-

电压相位角平面(V_{ep} - δ' 平面),推导出 V_{ep} - δ' 平面的暂态稳定边界条件,并据此提出一种基于“扰动能”对“任意剖分点电压相位角”之导数符号变化的实用判据;根据临界机组对的并网等效微分方程证明了在多机系统中临界机组对的相轨迹穿越相轨迹二阶导数为零的点时系统发生暂态功角失稳. 提出了适用于在线实时暂态稳定性分析的判别方法,所提方法利用 WAMS 提供的实时轨迹信息就能够实现对发电机暂态功角稳定的在线监测,无需进行复杂的迭代计算,也不需计算不稳定平衡点. 通过算例验证了所提出的暂态稳定判别方法及稳定裕度指标的可靠性.

1 单机无穷大系统在 V_{ep} - δ' 平面上的稳定边界

1.1 单机无穷大系统相平面暂态稳定边界

发电机内电动势经内电抗、变压器电抗和线路电抗到无穷大母线可统一等效为图 1 所示单机无穷大系统^[14] (One machine infinite bus, OMIB), $E\angle\delta_G$, $U_B\angle 0$ 分别为发电机等效内电动势和无穷大母线电压. 其动态过程可描述为^[15]:

$$\begin{aligned} \frac{d\delta}{dt} &= \omega_0 \Delta\omega \\ \frac{d\Delta\omega}{dt} &= (P_m - P_{em} \sin \delta) / T_j \end{aligned} \quad (1)$$

式中: P_m , P_{em} 和 T_j 分别为同步发电机的输入机械功率、输出电磁功率和机械惯性时间常数; δ , ω_0 分别为发电机转子角和同步旋转速度,单位为 rad. $\Delta\omega = \omega - 1$, $\Delta\omega$ 为相对于同步坐标的转子角速度, ω 为内电势旋转电角速度.

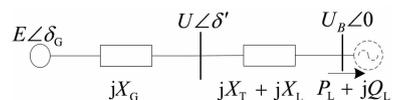


图 1 单机无穷大系统
Fig. 1 OMIB system

文献[16]结合 PEBS 法,定义了基于“脊”的暂态稳定边界,认为“脊”代表一种稳定极限. 文献[17]

基于位能脊定义的稳定边界,推导了基于单机广义暂态能量的改进位能脊公式。

式(1)所描述的单机无穷大系统的“脊”即不稳定平衡点满足以下条件:

$$R = \left\{ \delta \left| \frac{d\omega}{dt} = 0, \tau = \frac{d^2\omega}{dt^2} \frac{1}{\omega - 1} > 0 \right. \right\} \quad (2)$$

以下将这一条件向 $\omega\delta$ 平面推广:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{d\delta} \frac{d\delta}{dt} = \frac{d\omega}{d\delta} (\omega - 1) \quad (3)$$

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} \frac{1}{\omega - 1} = \frac{d\left(\frac{d\omega}{d\delta} \frac{d\delta}{dt}\right)}{d\delta} \frac{d\delta}{dt} \frac{1}{\omega - 1} = \frac{d^2\omega}{d\delta^2} (\omega - 1) + \left(\frac{d\omega}{d\delta}\right)^2 \quad (4)$$

即在 $\omega\delta$ 平面上单机无穷大系统的“脊”应该满足以下条件:

$$R = \left\{ \delta \left| \frac{d\omega}{d\delta} (\omega - 1) = 0, \tau = \frac{d^2\omega}{d\delta^2} (\omega - 1) + \left(\frac{d\omega}{d\delta}\right)^2 > 0 \right. \right\} \quad (5)$$

在单机无穷大系统失稳过程中,相轨迹在到达不稳定平衡点时转速仍未降到同步转速,其运行点穿过稳定平衡点并再次加速,此时式(5)中 $\omega - 1 \neq 0$ (且应有 $\omega - 1 > 0$),从而失稳点在 $\omega\delta$ 相平面上的暂态稳定边界点应满足:

$$R = \left\{ \delta \left| \frac{d\omega}{d\delta} = 0, \tau = \frac{d^2\omega}{d\delta^2} > 0 \right. \right\} \quad (6)$$

由式(6)可知位能脊是相轨迹上角速度对于功角变化的一阶导数为零且二阶导数大于零的点的集合.在线运用该判据时只需通过 PMU 实时采集到的转速偏差增量和功角数据就可实时判断机组的暂态稳定性。

1.2 $V_{ep}-\delta'$ 平面上的暂态稳定边界

由于发电机和其并网母线间的联络线起着传输转子上加速能量的作用,其上的 PMU 量测信息中含有与发电机大扰动后运行情况相关的信息,因此可间接用于评估电网的稳定态势.利用联络线上的信息作为暂态稳定在线监控的数据源则能提高实时量测信息的利用率.以下将基于式(6)所定义的 $\omega\delta$ 相平面上的暂态稳定边界条件,推导基于发电机和其并网母线间联络线 PMU 信息的暂态稳定判据。

故障后系统的暂态动能和暂态势能分别为^[5]:

$$V_{RE} = \frac{1}{2} M \Delta\omega^2 \quad (7)$$

$$V_{PE} = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_m - P_{emi} \sin \delta) d\delta \quad (8)$$

定义 发电机机械功率与电磁功率的差在时间闭区间 $[t_1, t_2]$ 上的积分为该台发电机的扰动能 V_{ep} :

$$V_{ep} = \int_{t_1}^{t_2} (P_m - P_{emi} \sin \delta) dt \quad (9)$$

式(9)的物理意义是:转子在 t_1 至 t_2 时段内动能的增量, t_1 所对应的时间点是故障切除时刻.比较式(8),式(9)可知暂态势能与文中所定义的扰动能区别在于暂态势能是转子不平衡功率对功角的积分,扰动能是转子不平衡功率在时域上的积分。

机端母线与无穷大母线间支路上的任意比例剖分点^[14]处与无穷大母线间线路电抗为:

$$jX' = k(jX_G + jX_T + jX_L), 0 < k < 1 \quad (10)$$

在比例剖分点 $X' = X_T + X_L$, 即 $k = (X_T + X_L) / (X_G + X_T + X_L)$ 处对系统暂态失稳情况进行观测, δ' 为该比例剖分点处电压相角.通过仿真研究发现,系统暂态失稳时,其在相平面上的运动轨迹与其在 $V_{ep}-\delta'$ 平面上的运动轨迹具有相似的几何特征.暂态稳定的情况下两种轨迹都具有凸的几何特性,而暂态失稳时两种轨迹则都具有凹的几何特征.如图2,图3所示.以下将通过 $\omega\delta$ 平面暂态稳定边界至 $\omega\delta'$ 平面的映射来推导 $V_{ep}-\delta'$ 平面轨迹的暂态稳定条件。

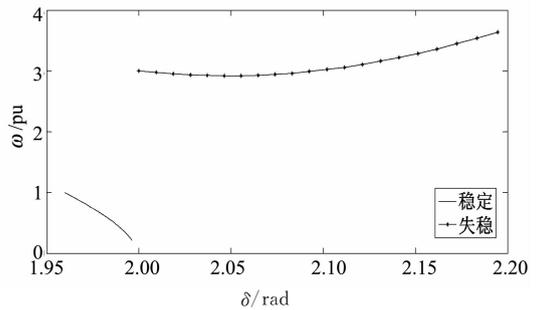


图2 单机无穷大系统相轨迹图

Fig. 2 Phase portrait of OMIB system

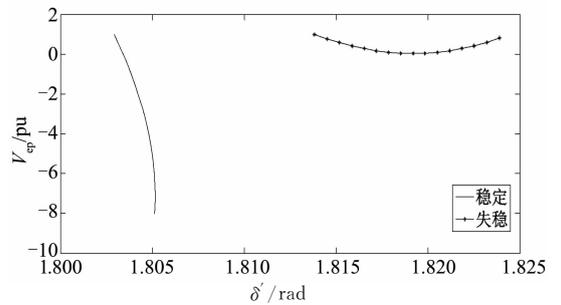


图3 $V_{ep}-\delta'$ 轨迹

Fig. 3 Portrait of $V_{ep}-\delta'$

将式(1)中第2式两边对时间分别求积分后得到:

$$V_{ep} = \int_{t_1}^{t_2} T_j \frac{d\omega}{dt} dt = \int_{t_1}^{t_2} (P_m - P_{emi} \sin \delta) dt \quad (11)$$

将式(11)两边分别对 δ' 求一阶和二阶导数后得到:

$$T_j \frac{d\omega}{d\delta} = \frac{d \int_{t_1}^{t_2} (P_m - P_{emi} \sin \delta) dt}{d\delta'} \quad (12)$$

$$T_j \frac{d^2\omega}{d\delta'^2} = \frac{d^2 \int_{t_1}^{t_2} (P_m - P_{emi} \sin \delta) dt}{d\delta'^2} \quad (13)$$

$\int_{t_1}^{t_2} (P_m - P_{emi} \sin \delta) dt$ 是发电机转子通过联络线在闭区间 $[t_1, t_2]$ 上增加的扰动能, 可通过 PMU 在发电机出口侧采集输出功率的实时信息并在时域上进行积分获得. 对于 $\omega\delta'$ 轨迹有:

$$\frac{d\omega}{d\delta} = \frac{d\omega}{d\delta} \frac{d\delta}{d\delta'} \quad (14)$$

$$\frac{d^2\omega}{d\delta'^2} = \frac{d^2\omega}{d\delta'^2} \left(\frac{d\delta}{d\delta'} \right) = \frac{d\omega}{d\delta} \frac{d^2\delta}{d\delta'^2} \quad (15)$$

$$\delta' = \arctan \frac{P_L X'}{U_B^2 + Q_L X} = f(\delta) \quad (16)$$

式(16)中, $P_L = \frac{EU_B}{X} \sin \delta$, $Q_L = \frac{EU_B}{X} \cos \delta - \frac{U_B^2}{X}$, $X = X_G + X_T + X_L$.

$\left\{ (V_{ep}, \delta') \left| \frac{dV_{ep}}{d\delta} = 0, \frac{d^2V_{ep}}{d\delta'^2} > 0 \right. \right\}$ 作为稳定边界条件充分性的证明: 当 $\omega\delta$ 平面上的相轨迹到达满足式(6)所定义的暂态稳定边界点时, 根据式(14), 式(15), 轨迹在 $\omega\delta'$ 平面上有 $\frac{d\omega}{d\delta'} = 0, \frac{d^2\omega}{d\delta'^2} > 0$, 充分性得证. 当 $\omega\delta'$ 平面上运动轨迹到达满足条件 $\left\{ \delta' \left| \frac{d\omega}{d\delta} = 0, \frac{d^2\omega}{d\delta'^2} > 0 \right. \right\}$ 的点时, 根据式(15)在 $\omega\delta'$ 平面上有 $\frac{d^2\omega}{d\delta'^2} = \frac{d^2\omega}{d\delta'^2} \left(\frac{d\delta}{d\delta'} \right)^2$, 由于 $\frac{d\omega}{d\delta} \neq 0$, 则当 $\frac{d\omega}{d\delta} = 0, \frac{d^2\omega}{d\delta'^2} > 0$ 成立时有 $\frac{d\omega}{d\delta} = 0, \frac{d^2\omega}{d\delta'^2} > 0$. 至此 $\frac{d\omega}{d\delta} = 0, \frac{d^2\omega}{d\delta'^2} > 0$ 作为系统暂态不返回边界点条件的充要性得证. 从而证得系统在 $V_{ep}\delta'$ 平面上满足条件 $\left\{ (V_{ep}, \delta') \left| \frac{dV_{ep}}{d\delta} = 0, \frac{d^2V_{ep}}{d\delta'^2} > 0 \right. \right\}$ 的点是暂态稳定边界点.

上述证明表明相轨迹与 $V_{ep}\delta'$ 轨迹同时到达暂态稳定边界点, 且在边界点处二者的几何特征相同, 即两种平面上的轨迹是同趋于凹或是同趋于凸的.

以上基于系统在 $\omega\delta$ 平面上的稳定边界条件,

推导了单机无穷大系统在 $\omega\delta'$ 平面上的暂态稳定边界, 从而得到了系统在 $V_{ep}\delta'$ 平面上的暂态稳定边界. 当系统在 $\omega\delta$ 平面上的运动轨迹穿过暂态稳定边界时, 其相应的在 $V_{ep}\delta'$ 平面上的运动轨迹也穿暂态稳定边界. 在实际工程应用中, 如果变压器与线路等效电抗之和较发电机(与内电势对应的)等效内电抗大得多, 则可直接利用发电机出口母线与并网母线间支路上的扰动能及电压相角信息作为关键量来判别系统的暂态稳定性.

1.3 单机无穷大系统暂态判据实用化改进

由于新的判据是以固定的临界值作为判别依据, 边界值为 $\frac{dV_{ep}}{d\delta_i} = 0, \frac{d^2V_{ep}}{d\delta_i^2} > 0$, 而实际 PMU 测量过程会受采样及噪声的影响, 很难精确获得 $\frac{dV_{ep}}{d\delta_i} = 0$ 的点. 通过对边界条件的分析发现, 该边界点是曲线的一个极值小点, 故在边界点的某个邻域内, 相轨迹斜率由负变正. 根据连续函数零值定理, 设函数 $y=f(x)$ 在闭区间 $[a, b]$ 上连续, 如果 $f(a)$ 与 $f(b)$ 异号, 那么在开区间 (a, b) 内至少有一点 ξ , 使得 $f(\xi)=0$ ($a < \xi < b$). 另外由于不稳定相轨迹是凹的, 即 $\frac{d^2V_{ep}}{d\delta_i^2} > 0$, 因此, 此处针对在线应用所推导的暂态稳定边界提出一种适用于在线暂态稳定识别的改进实用判据: 即, 若 $\frac{dV_{ep}}{d\delta_i}$ 的值在某一区间由负变正, 且在该区间上有 $\frac{d^2V_{ep}}{d\delta_i^2} > 0$, 则系统失稳.

2 多机系统的暂态稳定识别

2.1 临界机组对相轨迹几何特征的仿真分析

在多机系统中, 暂态功角失稳首先表现为系统中相对功角摆开最大的两台机组间的失稳. 对于故障后由系统中功角最超前机组(临界机)和最滞后机组(非临界机)构成的临界机组对而言, 若其相对稳定, 即其功角差在给定的有界范围内, 则系统中其他任意机组对间的功角也一定在有界范围内, 系统是稳定的; 若该机组对相对失稳, 则系统一定是失稳的^[18]. 因此最超前和最滞后机组对(下文统称临界机组对)的动态特征与多机系统的暂态稳定直接相关. 以下将组成临界机组对的两台发电机之间的功角差和转速差所构成的相平面轨迹称为临界机组对相轨迹. 临界机组对的并网等效模型如图4所示.

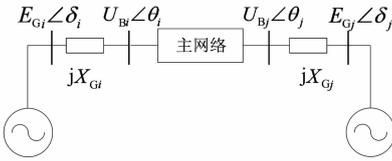


图4 临界机组对等效并网模型

Fig. 4 Equivalent model of critical generator pair connected to power net

通过仿真发现临界机组对相轨迹在稳定和失稳两种状态下轨迹的几何特征有明显区别. 当两机相对功角保持稳定时相轨迹始终不发生凹凸性的改变, 失稳时相轨迹在故障切除后立刻或一小段时间后出现凹凸性改变. 这一特征与文献[15]中单机无穷大系统相轨迹研究结论一致, 如图5所示.

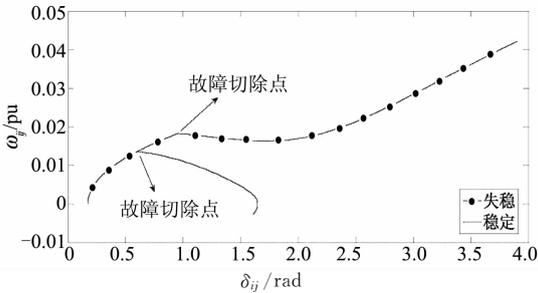


图5 临界机组对相轨迹图

Fig. 5 Phase portrait of critical generator pairs

基于上述特征可得推论: 多机系统失稳时临界机组对相轨迹穿过 $d\omega_{ij}^2/d\delta_{ij}^2 = 0$ 的点后将不再返回, 即相轨迹上 $\{(\omega_{ij}, \delta_{ij}) | d\omega_{ij}^2/d\delta_{ij}^2 = 0\}$ 的点构成了系统的不返回边界. 下文即证明此推论的正确性.

2.2 多机系统暂态不返回边界的证明

任意临界机组对中发电机的转子运动方程分别为:

$$\begin{cases} M_i \frac{d\omega_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} \sin(\delta_i - \theta_i) \\ \frac{d\delta_i}{dt} = \omega_0(\omega_i - 1) \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} M_j \frac{d\omega_j}{dt} = P_{mj} - P_{ej} \sin(\delta_j - \theta_j) \\ \frac{d\delta_j}{dt} = \omega_0(\omega_j - 1) \end{cases} \quad (18)$$

将式(17), 式(18)中1, 2式分别相减, 机组对简化为等效单机转子运动方程的形式^[14]:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_{ij}}{dt} = \frac{P_{Meq} - P_{Eq}}{M_{eq}} \\ \frac{d\delta_{ij}}{dt} = \omega_0 \omega_{ij} \end{cases} \quad (19)$$

式中:

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j \quad (20)$$

$$\omega_{ij} = \omega_i - \omega_j \quad (21)$$

$$M_{eq} = \frac{M_i M_j}{M_j + M_i} \quad (22)$$

$$P_{Meq} = \frac{M_j}{M_j + M_i} P_{Mi} - \frac{M_i}{M_j + M_i} P_{Mj} \quad (23)$$

$$P_{Eq} = \frac{M_j}{M_j + M_i} P_{Ei} - \frac{M_i}{M_j + M_i} P_{Ej} \quad (24)$$

在相对功角坐标下, 故障切除后 P_{Eq} 变化曲线类似正弦曲线, 可以用式(25)进行拟合^[18]:

$$P_{Eq} = A_3 + A_1 \sin(\delta_{ij} + A_2) \quad (25)$$

将式(22), (23), (25)代入式(19)后得到临界机组对的等值二阶自治系统方程. 根据二阶自治系统不返回边界证明结论, 稳定的相轨迹相对于故障后稳定平衡点总是凹的, 而不稳定的相轨迹相对于故障后稳定平衡点在故障切除后立刻或一小段时间后出现凸的几何特性^[15]. 因此, 临界机组对相轨迹上角速度相对于功角变化的二阶导数等于零, 即 $d\omega_{ij}^2/d\delta_{ij}^2 = 0$ 的点为该摆次的不返回边界点, 从而证明了1.2节推论假设成立. 因此对于多机系统, 在系统失稳时临界机组对相轨迹将穿过 $d\omega_{ij}^2/d\delta_{ij}^2 = 0$ 的点, 在该点处轨迹发生凹凸性的改变.

2.3 相轨迹几何特征判别暂态稳定的实用化规则

经临界机组对等效后得到的二阶自治系统方程, 反映临界机组对相轨迹暂态稳定的总体趋势. 但是在实际运用中, 轨迹会受到系统实际参数和不确定干扰等因素的影响, 此时利用暂态失稳判别条件来对实测轨迹进行判别就会出现误判, 因此需要对判据加入规则进行完善.

分析图6的临界机组对相轨迹, 弧A是系统固有参数在相轨迹上的干扰段, 弧B是随机干扰在相轨迹上的干扰段, 在这两处相轨迹有凹凸性和斜率变化量的改变, 但是其不影响相轨迹最终几何趋势, 轨迹的最终趋势由弧段A和B外的弧段决定. 因此需将轨迹中的干扰弧段进行处理后才能用第2.2节给出的不返回边界条件进行识别. 针对以上问题, 在算法中制定了两个暂态稳定识别规则:

1) 通过干扰弧段的分析发现, 尽管在干扰弧段出现了凹凸性即斜率变化量的改变, 但是从第一个拐点出现到进入下一个拐点, 两点之间角度差 $\Delta\delta_{ij}$ 值和速度差 $\Delta\omega_{ij}$ 值都很小, 根据PSASP两相、三相短路失稳情况共25组数据仿真结果分析, 设定判别

阈值为:

$$\Delta\omega\%_0 = |\Delta\omega_{ij}| / |\max\Delta\omega_{ij}| < 0.1$$

$$\Delta\delta\%_0 = |\Delta\delta_{ij}| / |\max\Delta\delta_{ij}| < 0.2$$

若其中一个条件不满足则认为在该弧段并未发生凹凸性的改变,转而进行下一弧段的判别.上述阈值在多数失稳情况下都适用. $|\max\Delta\omega_{ij}|$, $|\max\Delta\delta_{ij}|$ 分别为故障切除前临界机组对相对角速度和相对角的最大值.

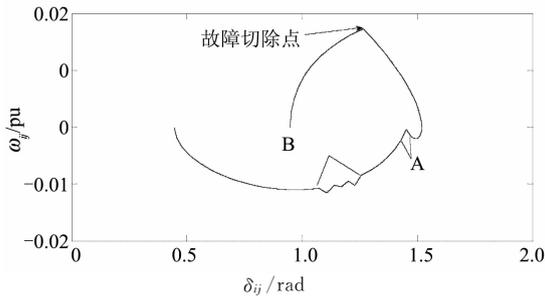


图6 信号受干扰情况下临界机组对稳定时相轨迹
Fig. 6 Stability phase portrait of critical generator pair in when the signal is interference

2)在进行识别之前需将 $\omega_{ij} > 0$ 和 $\omega_{ij} < 0$ 的数据分别提取出来用规则1)进行处理后再进行暂态稳定识别.

3 仿真算例检验

为验证本文所提方法的有效性,本节采用 PSASP 6.28 WEPRI 8机36节点系统模型,在不同地点设置故障并改变故障持续时间进行仿真.仿真步长为 10 ms,将仿真数据作为从 WAMS 上实时获得的测量数据,将通过观测发电机摇摆曲线判别的暂态稳定结果与文中定义的判据判别的结果进行比较来验证判据的有效性.

3.1 单机 $V_{ep}-\delta'$ 平面失稳判据验证

为验证文中所提 $V_{ep}-\delta'$ 平面运动暂态稳定边界判据的有效性.选取母线 24 上三相接地短路 0 s 故障,450 ms 将故障切除,利用变压器高压母线处测量得到的实时功率按式(10)计算扰动能,同时测量变压器出口母线处电压相角.计算 V_{ep} 对 δ' 的一阶和二阶导数,结果见表 1.

表1 1号节点处 $V_{ep}-\delta'$ 轨迹采样数据
Tab.1 $V_{ep}-\delta'$ trajectory sampling
datas of the number one bus

采样时刻/s	$dV_{ep}/d\delta'$	$d^2V_{ep}/d\delta'^2$
0.46	1.05	-1.05
0.47	1.07	-1.18
0.48	1.09	-1.39
0.49	1.13	-1.72
0.50	1.17	-2.24
0.51	1.21	-3.05
0.52	1.27	-4.37
0.53	1.34	-6.64
0.54	1.45	-10.88
0.55	1.60	-19.72
0.56	1.81	-41.72
0.57	2.19	-115.2
0.58	3.00	-580.02
0.59	5.60	1 633.3
0.60	-0.03	7 396.9
0.61	-1.37	581.1
0.62	-7.28	37.6
0.63	-0.4	17.1
0.64	-0.2	903.15
0.65	-0.066	533.5
0.66	0.031	3.41
0.67	0.104	2.31

分析表 1 的结果,在故障发生后 0.65 s 处 $dV_{ep}/d\delta' < 0$,在故障发生后 0.66 s 处 $dV_{ep}/d\delta' > 0$,且这两个连续的采样点处均有 $d^2V_{ep}/d\delta'^2 > 0$,根据 1.3 节的改进判别方法,可在 0.66 s 判别出系统失稳.

3.2 多机系统暂态稳定判据验证

下面选取 41 号线路发生三相短路故障时稳定和失稳两种状态下的仿真结果来验证所提临界机组对相轨迹稳定判据的有效性.在故障持续时间为 100 ms(系统稳定)和 300 ms(系统失稳)两种情况下,提取 6 号机和 8 号机构成的临界机组对相轨迹采样数据并对其进行了解析.

系统稳定时临界机组对相轨迹采样计算结果见表 2,此时 $|\max\Delta\omega_{ij}| = 0.0133$, $|\max\Delta\delta_{ij}| = 0.2204$.

按照第 2.2 节中所定义的识别规则 2),把数据沿着时间轴对相轨迹 $\omega_{ij} < 0$ 和 $\omega_{ij} > 0$ 部分分别进行识别.

1)在 0.11 s 至 0.22 s 采样区间, $\omega_{ij} < 0$, $d^2\omega_{ij}/d\delta_{ij}^2$ 在 0.11 s 至 0.21 s 为正.0.21 s 至 0.22 s $d^2\omega_{ij}/d\delta_{ij}^2$ 由正变负,相轨迹发生凹凸性改变,按照判据系统是失稳的.但是,在 0.23 s 至 0.50 s 采样

区间, $\omega_{ij} > 0$, $d^2\omega_{ij}/d\delta_{ij}^2$ 在 0.23 s 至 0.30 s 为负, 按照规则 1) 在 0.22 s 至 0.3 s 时段内 $\Delta\omega\% < 0.1$, $\Delta\delta\% < 0.2$, 故该时段的数据失效, 系统在该区段未穿过不返回边界点.

表2 系统稳定时临界机组对相轨迹采样数据
Tab.2 Critical generator pairs trajectory
sampling datas of stability

采样时刻/s	$d^2\omega_{ij}/d\delta_{ij}^2$	角度偏差/%	转速偏差/%	ω_{ij}/pu
0.11	0.058 8	0	0	-0.014 1
0.12	0.145 0	0.187 0	0.151 9	-0.121 0
0.13	0.168 1	0.346 7	0.288 0	-0.010 3
0.14	0.193 3	0.481 5	0.414 3	-0.008 6
0.15	0.381 5	0.593 6	0.528 6	-0.007 1
0.16	0.706 0	0.685 2	0.629 3	-0.005 8
0.17	1.201 0	0.758 8	0.719 5	-0.004 6
0.18	2.767 7	0.816 1	0.808 0	-0.003 5
0.19	6.408 5	0.859 0	0.872 2	-0.002 5
0.20	26.525 5	0.889 0	0.935 3	-0.001 7
0.21	376.068 2	0.908 1	0.988 7	-9.8 × 10 ⁻⁴
0.22	-3.388 5 × 10 ³	0	0	-3.8 × 10 ⁻⁴
0.23	-290.929 2	0	0	1.0 × 10 ⁻⁴
0.24	-36.004 2	0.004 2	0.028 6	4.8 × 10 ⁻⁴
0.25	-13.482 2	0.013 1	0.050 4	7.7 × 10 ⁻⁴
0.26	-6.211 6	0.025 5	0.066 2	9.8 × 10 ⁻⁴
0.27	-3.194 4	0.040 3	0.075 9	0.001 1
0.28	-2.126 6	0.056 6	0.081 2	0.001 2
0.29	-2.118 0	0.073 7	0.083 5	0.001 2
0.30	-1.533 3	0.090 9	0.083 5	0.001 2
0.31	1.439 3	0	0	0.001 2
0.32	0.762 7	0.016 5	0.003 8	0.001 1
0.33	1.707 3	0.032 5	0.006 0	0.001 1
0.34	1.737 3	0.048 0	0.007 5	0.001 1
0.35	2.424 1	0.063 3	0.007 5	0.001 1
0.36	3.472 3	0.078 8	0.006 0	0.001 1
0.37	2.544 8	0.094 8	0.002 3	0.001 1
0.38	0.590 4	0.112 0	0.005 3	0.001 2
0.39	1.396 3	0.130 9	0.016 5	0.001 4
0.40	-0.483 7	0	0	0.001 6
0.41	0.706 9	0	0	0.001 8
0.42	-0.513 9	0	0	0.002 1
0.43	-0.138 9	0.032 0	0.024 8	0.002 4
0.44	-0.237 5	0.068 8	0.051 1	0.002 8
0.45	-0.347 9	0.110 9	0.080 5	0.003 1
0.46	-0.131 9	0.158 7	0.112 0	0.003 6
0.47	-0.255 0	0.212 7	0.144 4	0.004 0
0.48	-0.149 1	0.273 0	0.178 9	0.004 5
0.49	-0.182 5	0.339 0	0.213 5	0.004 9
0.50	-0.140 0	0.414 3	0.248 9	0.005 4

2) 在 0.3 s 至 0.31 s, $d^2\omega_{ij}/d\delta_{ij}^2$ 由负变正, 0.31 s 至 0.39 s 采样区间 $d^2\omega_{ij}/d\delta_{ij}^2$ 为正, 但是在这两个区段 $\Delta\omega\% < 0.1$, $\Delta\delta\% < 0.2$ 按照规则 1), 0.31 s 至 0.39 s 时间段系统未穿过不返回边界点. 与上述识

别过程类似, 继续对后续的时段进行识别, 0.39 s 至 0.41 s 时段的数据都是失效数据. 在 0.42 s 至 0.50 s, $d^2\omega_{ij}/d\delta_{ij}^2$ 为负, $\Delta\omega\% > 0.1$, $\Delta\delta\% > 0.2$, 系统始终未穿过不返回边界点, 是稳定的.

系统失稳时临界机组对相轨迹采样计算结果见表 3, 此时 $|\max\Delta\omega_{ij}| = 0.030 5$, $|\max\Delta\delta_{ij}| = 1.442 6$.

表3 系统失稳时临界机组对相轨迹采样数据
Tab.3 Critical generator pairs trajectory
sampling datas of instability

采样时刻/s	$d^2\omega_{ij}/d\delta_{ij}^2$	角度偏差/%	转速偏差/%	ω_{ij}/pu
0.31	-0.001 2	0	0	0.031 6
0.32	-2.078 0 × 10 ⁻⁴	0.068 9	0.008 9	0.031 8
0.33	-2.073 6 × 10 ⁻⁴	0.138 3	0.017 4	0.032 0
0.34	0.002 7	0	0	0.032 3
0.35	0.002 6	0.070 6	0.008 5	0.032 5
0.36	0.002 5	0.141 8	0.018 0	0.032 8
0.37	0.005 1	0.213 6	0.028 5	0.033 2
0.38	0.003 1	0.286 2	0.040 0	0.033 5
0.39	0.003 7	0.359 2	0.053 4	0.033 9
0.40	-0.014 7	0	0	0.034 4
0.41	0.004 6	0	0	0.034 9
0.42	0.005 2	0.076 3	0.010 8	0.035 2
0.43	0.005 0	0.153 3	0.023 6	0.035 6
0.44	0.005 4	0.231 3	0.038 7	0.036 0
0.45	0.006 5	0.310 4	0.056 1	0.036 6
0.46	0.003 3	0.390 7	0.076 1	0.037 2
0.47	0.004 3	0.472 4	0.099 3	0.037 9
0.48	0.003 9	0.555 8	0.124 6	0.038 7
0.49	0.002 3	0.640 9	0.152 5	0.039 5
0.50	0.002 1	0.728 0	0.183 0	0.040 4
0.51	0.001 9	0.817 1	0.215 4	0.041 4
0.52	5.990 6 × 10 ⁻⁵	0.908 5	0.249 8	0.0420 5

在 0.31 s~0.33 s 采样区间, $d^2\omega_{ij}/d\delta_{ij}^2$ 为负, 在采样时刻 0.34 s~0.39 s, $d^2\omega_{ij}/d\delta_{ij}^2$ 为正, 由于该时段 $\Delta\omega\% > 0.1$, $\Delta\delta\% > 0.2$, 结合规则 1), 该时段数据是有效数据, 临界机组对相轨迹上 $d^2\omega_{ij}/d\delta_{ij}^2$ 由负变为正的時刻系统穿过不返回边界点, 系统失稳.

4 结 论

本文基于单机无穷大系统暂态稳定边界条件和二阶自治系统不返回边界条件, 研究适用于在线分析的暂态稳定识别方法.

1) 对单机无穷大系统 $V_{ep}-\delta'$ 平面上暂态稳定边界条件进行了分析, 严格证明了系统在 $V_{ep}-\delta'$ 平面上的轨迹与系统在相平面上的轨迹具有相似的几何特征, 借助这一判据可将系统暂态稳定的观测点延伸至发电机出口母线至并网母线间线路上.

2)对临界机组对相轨迹几何特征进行仿真分析,发现临界机组对相轨迹与单机无穷大系统相轨迹在失稳和稳定时具有相似的几何特征.证明了采用轨迹几何特征进行暂态稳定判断同样适用于多机系统的情况,它在相平面上的不返回边界条件与单机无穷大系统是相似的.

3)结合所提出的暂态不返回边界判据在线运用时可能遇到的问题,提出了附加的实用判别规则,所提方法不需要对聚合后的电磁功率参数进行拟合,也无需计算平衡点,仿真结果表明了所提出的方法的有效性.

文中的暂态稳定边界条件是在二阶非线性自治方程分析的基础上得出的,适用于系统单摆失稳的情况.文中附加判别规则中所定阈值多数情况下适用,但具体仍要视故障信号扰动量分布而定.文中所提判据相对一般取 180° 作为失稳判别阈值的方法具有一定预判性,但不具备故障切除前后短时间迅速预判系统稳定趋势的功能.在非自治系统和多摆失稳模式下判据的适用性仍有待进一步讨论.

参考文献

- [1] 谭伟,沈沉,刘峰,等.基于轨迹特征根的暂态稳定使用判据[J].电力系统自动化,2012,36(16):14-19.
TAN Wei, SHEN Chen, LIU Feng, *et al.* A practical criterion for trajectory eigenvalues based transient stability analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 14-19. (In Chinese)
- [2] 顾卓远,汤涌,孙华东,等.一种基于转速差-功角差变化趋势的暂态功角稳定辨识方法[J].中国电机工程学报,2013,33(31):65-72.
GU Zhouyuan, TANG Yong, SUN Huadong, *et al.* An identification method for power system transient angle stability based on the trend of rotor speed difference-rotor angle difference [J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(31): 65-72. (In Chinese)
- [3] 兰洲,倪以信,甘德强.现代电力系统暂态稳定控制研究综述[J].电网技术,2005,29(15):40-50.
LAN Zhou, NI Yixin, GAN Deqiang. A survey on transient stability control of modern power systems [J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 40-50. (In Chinese)
- [4] 刘笙,旺静.电力系统暂态稳定的能量函数分析[M].上海:上海交通大学出版社,1996:1-7.
LIU Sheng, WANG Jing. The energy function analysis of power system transient stability [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1996: 1-7. (In Chinese)
- [5] 倪以信,陈寿孙,张宝霖.动态电力系统的理论和分析[M].北京:清华大学出版社,2002:181-215.
NI Yixin, CHEN Shousun, ZHANG Baolin. Dynamic power system theory and analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 181-215. (In Chinese)
- [6] RAHIMI F A, LAUBY M G, WRUBEL J N, *et al.* Evaluation of the transient energy function method for on-line dynamic security analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(2): 497-507.
- [7] CHIANG H, WU F F, VARAIYA P P. A BCU method for direct analysis of power system transient stability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1194-1208.
- [8] 石桓初.基于PC机群的电力系统暂态稳定评估[J].电力系统保护与控制,2009,37(10):6-14.
SHI Huanchu. Personal computer cluster based power system stability assessment [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 6-14. (In Chinese)
- [9] 王科,游大海,尹项根,等.基于支路势能脊的电力系统暂态稳定分析和临界割集识别[J].电工技术学报,2013,28(11):262-268.
WANG Ke, YOU Dahai, YIN Xianggen, *et al.* Power system transient stability analysis and critical cutset detection based on branch ridge [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 262-268. (In Chinese)
- [10] 李迁,李华强,黄昭蒙,等.基于暂态能量函数混合的电力系统脆弱性分析[J].电力系统保护与控制,2013,41(20):1-6.
LI Qian, LI Huaqiang, HUANG Zhaomeng, *et al.* Power system vulnerability assessment based on transient energy hybrid method [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 1-6. (In Chinese)
- [11] 刘兆燕,江全元,曹一家.基于广域测量系统的快速暂态稳定预测方法[J].电力系统自动化,2007,31(21):1-4.
LIU Zhaoyan, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Fast learning algorithm for transient stability prediction based on wide-area measurement system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 1-4. (In Chinese)
- [12] 顾雪萍,李扬,吴献吉.基于局部学习机和细菌群体趋药性算法的电力系统暂态稳定评估[J].电工技术学报,2013,28(10):271-279.
GU Xueping, LI Yang, WU Xianji. Transient stability assessment of power systems based on local learning machine and bacterial colony chemotaxis algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 271-279. (In Chinese)
- [13] 卢锦玲,朱永利,赵洪山,等.提升型贝叶斯分类器在电力系统暂态稳定评估中的应用[J].电工技术学报,2009,24(5):177-181.
LU Jinling, ZHU Yongli, ZHAO Hongshan, *et al.* Power system transient stability assessment based on boosting Bayesian classifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 177-181. (In Chinese)
- [14] 刘道伟,马世英,李柏青,等.基于响应的电网暂态稳定态势在线量化评估方法[J].中国电机工程学报,2013,33(4):85-95.
LIU Daowei, MA Shiyong, LI Baiqing, *et al.* Quantitative method for on-line power system transient stability assessment based on response information [J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(4): 85-95. (In Chinese)
- [15] 谢欢,张保会,于广亮,等.基于相轨迹凹凸性的电力系统暂态稳定性识别[J].中国电机工程学报,2006,26(5):38-42.
XIE Huan, ZHANG Baohui, YU Guangliang, *et al.* Power system transient stability detection theory based on characteristic concave of trajectory [J]. Proceeding of the CSEE, 2006, 26(5): 38-42. (In Chinese)
- [16] RYUICHI A, IWAMOTO S. Highly reliable transient stability solution method using energy function [J]. Electrical Engineering in Japan, 1988, 108(4): 253-260.
- [17] 王科,游大海,陈震海,等.基于改进势能脊的电力系统暂态稳定快速识别算法[J].电网技术,2011,35(12):89-93.
WANG Ke, YOU Dahai, CHEN Zhenhai, *et al.* An improved potential energy ridge based fast recognition algorithm for power system transient stability [J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 89-93. (In Chinese)
- [18] 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. (In Chinese)