编者按语：

通过电力系统广域测量系统（WAMS），可以实时获得系统中各发电机的功角及其他状态量，比利用数值仿真得到的更为准确、真实，使得依据电力系统响应的实时控制成为可能。本组“电力系统暂态稳定性闭环控制”（7 篇）论文，以 WAMS 为实现基础，提出了观测功角、角速度相轨迹凹凸性判别暂态稳定性的理论，用相轨迹凹凸性变化指标快速预测稳定性，代替长时间观测功角摇摆；在多机系统中，提出实时分群、凹凸性随时间的变化速度指标，保证失稳判据的有效性；采用滚动预测未来轨迹的方法，提高不稳定判别速度，为提高控制效果赢得更多的时间；发现了相轨迹斜率与阻止不稳定需要的切机量之间的关系，给出了维持暂态稳定需要的最小切机量实时计算方法，以及有效切机控制机组筛选和优先分配的方法，保证切机控制的高效性。整组文章对暂态不稳定预测，最小控制实时计算、分配，闭环控制系统的实现技术等进行了全面探讨，展现了电力系统暂态稳定闭环控制后坚强智能电网的前景，欢迎各位专家讨论、争鸣，充分利用现代电网通信条件，开发更多有价值的理论和技术，为电力系统技术发展做出贡献。

电力系统暂态稳定性闭环控制（一）——简单电力系统暂态不稳定判别原理

张保会，杨松浩，王怀远
（西安交通大学 电气工程学院，陕西 西安 710049）

摘要： 随着广域动态信息测量系统的发展，发电机运动轨迹可以实时测量获得，使得暂态稳定性的闭环控制可能实现。通过研究角速度-功角相平面上拐点曲线附近的方向场，发现并证明了理想发电机运动轨迹由凹区域进入凸区域后系统暂态不稳定。提出一个由相轨迹斜率表示的形式简单、实时性强的不稳定判据，该判据为启动稳定控制措施提供依据。在 PSASP 中搭建的单机无穷大系统的仿真结果表明，所提不稳定判据适应不同的系统参数、故障类型以及复杂的多次扰动情况，具有快速性和准确性。

关键词： 电力系统；发电机轨迹；凹凸性；暂态；稳定性；控制；不稳定判据

中图分类号： TM 712　　**文献标识码：** A　　DOI：10.3969/j.issn.1006-6047.2014.08.001

0 引言

电力系统的暂态稳定性分析与控制一直是电力系统工作人员致力研究的重要、困难问题之一，对于大型电力系统暂态稳定的实时、有效控制更是需要而没有解决的重大问题。首先是稳定性的快速判别存在困难。我国《电力系统安全稳定导则》对电力系统暂态稳定性的定义是“暂态稳定是指电力系统受到大扰动后，各同步电机保持同步运行并过渡到新的或恢复到原来稳态运行方式的能力”。“暂态稳定的判据是电网遭受每一次大扰动后，引起电力系统各机组之间功角相对增大，在经过第一或第二个振荡周期不失步，作同步的衰减振荡，系统中枢点电压逐渐恢复。”欲得出是否稳定的结论，需要准确获取大扰动后长久的运动响应，凭眼睛和经验观察运动轨迹的发展趋势。为了高效获取准确的运动轨迹，几十年来发展电力系统稳定计算方法与软件，对发电机及其调节系统模型、参数进行精确建模与实测，并对各类负荷动态特性及其所占比例进行建模、估计和等值，目前尚难以完全精确仿真一次稳定事故。

即使准确计算了大扰动后系统的响应，因为缺少快速的不稳定判据，根据轨迹发展趋势判别出系统向不稳定发展时，已来不及投入控制措施。实践中，为了保障大扰动后系统的暂态稳定，常使用安全稳定紧急控制系统，通常针对电力系统的低概率但可能发生的暂态不稳定事故，主要采用“离线制定策略表，实时匹配”的控制方法[1]。通过对电力系统多种运行方式下预想故障集进行仿真计算，并且形成相应控制措施的决策表，故障发生后，根据实际发生的故障从预先计算确定的控制策略表中选择适当的对策。目前也尝试使用“在线制定策略表，实时匹配”，它是根据当前运行方式-预想故障-决策表，减少了对系统运行方式的预想计算量和选择合适的控制措施[2]。但这种“凭计算决策”实施控制系统受限于各元件模型和参数的准确性以及预想故障集与实际故障的差别，有其无法避免的局限性。

随着近些年来相量测量单元（PMU）以及广域测量系统 WAMS（Wide Area Measurement System）在电力系统中的建设和发展，实时地获取发电机轨迹信息已经成为可能。发电机实时响应的轨迹，直接反映了电力系统暂态稳定的程度，根据实测的轨迹信息进行实时暂态稳定性的分析和控制具有准确、不依赖于模型和参数的优点。

收稿日期：2014-05-22

早期的文献研究从稳定性仿真计算输出的轨迹中提取暂态稳定性的信息，以便尽早得到是否稳定的结论，节约仿真计算时间。文献[3]提出用轨迹的暂态能量概念来分析系统的暂态稳定性。文献[4-6]提出了根据电力系统机电暂态过程中加速度和转速的轨迹信息来分析发电机暂态能量的变化情况，并且根据暂态能量沿轨迹变化的特点给出了发电机的稳定和不稳定指标，以上研究开启了不再凭眼睛和经验观察运动轨迹的发展趋势判别稳定性的思路。

文献[7-10]根据PMU的发展，提出利用实测轨迹的凹凸性进行暂态稳定性判别和计算稳定裕度，但是文中只是根据仿真结果发现了轨迹凹凸性和暂态稳定性的关系，没有提出一个明确的稳定性判定指标，也没有进行严格的理论证明。文献[11-13]提出了依据轨迹凹凸性的暂态稳定性判别指标，针对理想发电机进行了指标充分、必要性证明，并将该指标扩展应用于多机系统的稳定性判别，开创了依据系统响应快速判别暂态稳定性的先河。

依据系统的响应实现暂态稳定性的闭环控制属首次提出，展示了电力系统控制未来发展的前景，其理论、方法处于探索阶段。整合本课题组几十年对暂态稳定紧急控制研究的成果，结合WAMS信息系统的发展，本系列文章将全面讨论依据实测轨迹的凹凸性在简单系统、多机系统实时判别稳定性、预测判别稳定性、实时计算切机控制量、合理分配切机地点等，构成经济有效的暂态稳定性闭环控制的理论和实现技术。

1 相平面和相轨迹

简单的单机无穷大电力系统的结构见图1。

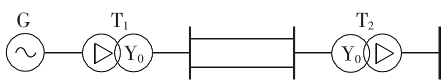

图1 单机无穷大系统线路图

Fig.1 Connection diagram of single-machine infinite-bus system

描述图1中发电机G暂态过程的微分方程式为：

$$\begin{cases}\dot{\delta}=\omega_0\Delta\omega\\ M\Delta\dot{\omega}=P_m-P_e-D\omega_0\Delta\omega\end{cases}\tag{1}$$

其中，δ为发电机功角；ω_0为同步电角速度，一般$\omega_0=2\pi f_0=100\pi$，f_0为发电机电频率；M为发电机转动惯量；P_m为发电机机械功率；P_e为发电机电磁功率；D为发电机阻尼系数。在理想的单机无穷大系统中，忽略阻尼，不计调节器和调速器作用，发电机的电磁功率与功角呈正弦关系：

$$P_e=P_{emax}\sin\delta\tag{2}$$

其中，P_{emax}为电磁功率峰值。

因此式(1)可以写成：

$$\begin{cases}\dot{\delta}=\omega_0\Delta\omega\\ M\Delta\dot{\omega}=P_m-P_{emax}\sin\delta\end{cases}\tag{3}$$

以功角δ为横坐标、角速度$\Delta\omega$(标幺值，后同)为纵坐标形成二维相空间，将发电机的运动状态按照时间的顺序表现在相平面中可以描绘出变化的轨迹曲线如图2所示。

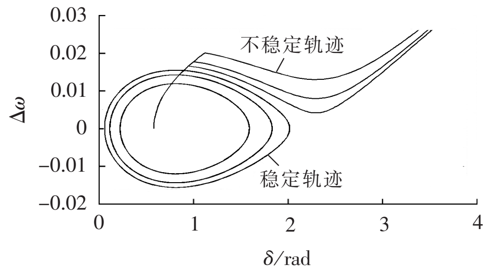

图2 稳定轨迹与不稳定轨迹

Fig.2 Stability trajectory and instability trajectory

系统稳定的定义为：在相平面中，功角和角速度在一定的范围内变化，稳定的轨迹会回摆，而不稳定的轨迹则会发散。观察发现，稳定的轨迹与不稳定的轨迹在相平面上具有明显的差异。

2 轨迹凹凸性和稳定性

为了寻找电力系统暂态稳定性与轨迹形状的关系，首先研究稳定的轨迹与不稳定轨迹的几何特征。下面将对相平面中轨迹的方向场进行分析。

在相平面中，轨迹的斜率为：

$$k=\frac{d\Delta\omega}{d\delta}\tag{4}$$

斜率为正、值越大，角速度加速越快；斜率为负、值越大，则角速度减速越快。

令斜率随功角的变化率为：

$$l=\frac{dk}{d\delta}=\frac{d^2\Delta\omega}{d\delta^2}\tag{5}$$

根据数学中对曲线凹凸性的定义[14]：设函数$F(x)$在区间I上二阶可导，若$\forall x\in I$，均有$F''(x)>0(<0)$，则称$F(x)$在I上是严格凸(凹)的。

为了便于分析，可以将相平面中轨迹的凹凸性定义如下。

a. 当轨迹位于相平面的上半平面($\Delta\omega>0$)时，如果$l<0$，则相轨迹为凹轨迹；当轨迹位于相平面的下半平面($\Delta\omega<0$)时，如果$l>0$，则相轨迹为凹轨迹。

b. 当轨迹位于相平面的上半平面($\Delta\omega>0$)时，如果$l>0$，则轨迹为凸轨迹；当轨迹位于相平面的下半平面($\Delta\omega<0$)时，如果$l<0$，则轨迹为凸轨迹。

c. 如果$l=0$，则此时轨迹位于凹凸性变化的拐点。

按照定义，令式(5)等于0，则可以获得轨迹凹凸性变化的拐点，其曲线的表达式为：

$$\Delta\omega=\pm\sqrt{\frac{(P_m-P_{emax}\sin\delta)^2}{-P_{emax}M\omega_0\cos\delta}} \tag{6}$$

由式(6)可以看出,在 $\delta\in(0,2\pi)$ 区间内,拐点曲线只可能穿越功角 $\delta\in(\pi/2,\pi)$ 区间,因为该区段才有实数解,其形状如图 3 所示。当角速度偏差为零时,拐点曲线与坐标轴相交,对应的点为 δ_u,即不稳定平衡点,也就是电力系统暂态稳定分析理论中的鞍点[15]。利用轨迹是否穿越拐点曲线,能比功角是否超过不稳定平衡点更快地判别稳定性。

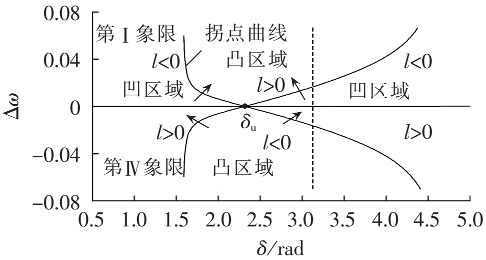

图 3　第Ⅰ和Ⅳ象限内拐点曲线及拐点处的轨迹方向

Fig.3 Inflection point curve in quadrant Ⅰ and Ⅳ, and trajectory direction at inflection point

为了研究轨迹在凹凸性拐点处的变化方向,将凹凸性指标 l 对时间求导,可以获得拐点处凹凸性的变化方向[12]:

$$\left.\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}\right|_{l=0}=P_{emax}M(\Delta\omega)^2\sin\delta \tag{7}$$

由式(7)可知,系统惯性常数 M、电磁功率峰值 P_{emax}、$(\Delta\omega)^2$ 始终大于 0,当功角处于 $(0,\pi)$ 范围时,$\sin\delta>0$,式(7)的值始终大于 0,说明在轨迹随时间增大穿越拐点处时其轨迹凹凸性指标 l 随时间的变化率为正,即 l 的值随时间变化会越来越大。由于拐点处 $l=0$,因此,拐点处凹凸性指标 l 变化方向为由负变正。当相轨迹在功角处于 $(0,\pi)$ 范围内与拐点曲线相交时,即轨迹在拐点处随时间的变化方向是由 $l<0$ 的区域指向 $l>0$ 的区域,形成了图 3 所示的由凹区域到凸区域变化的方向场。

根据经典的暂态稳定性理论[16],在平衡点处系统的机械功率与电磁功率相同,如果系统的功角超过不稳定平衡点 δ_u,即可判别系统不稳定。由式(2)可求出理想单机自治系统的不稳定平衡点为:

$$\delta_u=\pi-\arcsin\frac{P_m}{P_{emax}} \tag{8}$$

由式(8)可知,单机系统的不稳定平衡点 δ_u 在 $(\pi/2,\pi)$ 内。

为了研究第Ⅰ、Ⅲ象限内轨迹凹凸性与单机自治系统暂态稳定性的关系,本文提出以下 2 个定理。

定理 1:稳定的轨迹不会与拐点曲线相交。

这可以通过反证法进行证明。假设系统受扰动后暂态稳定,且稳定轨迹与拐点曲线相交。根据图 3 所示的拐点曲线附近的轨迹方向场,则轨迹在 $\delta\in(\pi/2,\pi)$ 区间内一直处于凸区域,而不会出现功角变小返回的情况,否则返回轨迹与拐点曲线再次相交时与图 3 的方向场相违背。当轨迹处于凸区域内角速度增量 $\Delta\omega$ 为正,则轨迹的功角不断增加,所以轨迹一定会经过不稳定平衡点 δ_u,由前面的分析可知,在单机系统中,若轨迹经过不稳定平衡点,则系统失稳。这与轨迹为稳定轨迹的假设违背,因此稳定轨迹一定不会与拐点曲线相交。

定理 2:失稳的轨迹一定与拐点曲线相交。

对于失稳的轨迹,功角不断增加,则一定会超过不稳定平衡点。由图 3 可以看出,系统的相轨迹在超过不稳定平衡点 δ_u 前一定会先与拐点曲线相交。

当轨迹位于第Ⅲ象限时,由于功角和角速度均为负值,因此可能会发生反向失稳。当系统处于反向失稳时,拐点曲线及其方向场如图 4 所示。由式(7)可知,当轨迹位于第Ⅲ象限的 $(-\pi,0)$ 区间内时,凹凸性指标随时间的变化率为负,轨迹穿越拐点曲线时由 $l>0$ 的区域(凹区域)指向 $l<0$ 的区域(凸区域),不稳定平衡点 δ_u 为负值,如果系统轨迹减速(即反向加速)超过此不稳定平衡点则说明系统反向失稳。通过上面类似的推导过程可以得出相似的结论:当系统轨迹位于第Ⅲ象限时,稳定轨迹不会与拐点曲线相交,而失稳轨迹必定与拐点曲线相交。因此同样可以通过检测第Ⅲ象限的相轨迹是否位于凸区域内或者是否与拐点曲线相交来判断系统的暂态稳定性。

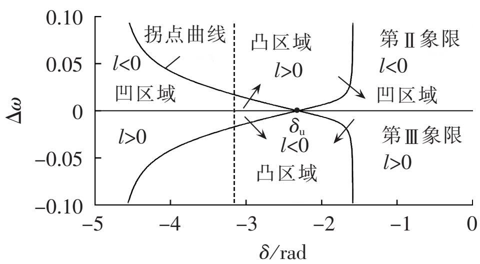

图 4　第Ⅱ和Ⅲ象限内的拐点曲线及拐点处的轨迹方向

Fig.4 Inflection point curve in quadrant Ⅱ and Ⅲ, and trajectory direction at inflection point

当轨迹位于第Ⅱ、Ⅳ象限时,由于功角和角速度的符号相反,系统处于相对减速的状态,从图 3 和图 4 中看出,拐点曲线附近的方向场是由凸区域指向凹区域,使得轨迹不会进入凸区域,从而使系统轨迹有界,系统稳定。

推论:综合定理 1 与定理 2,当相轨迹在第Ⅰ、Ⅲ象限变化,若轨迹穿越拐点曲线,则系统暂态不稳定。如图 5 所示,只要轨迹与拐点曲线相交,即由凹区域进入凸区域,则表明系统失稳,否则可认为系统暂态稳定。

上述轨迹的凹凸性和系统稳定性的关系也可以表述如下:

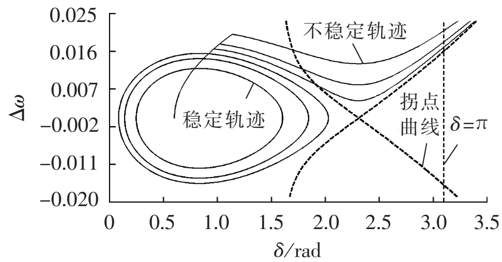

图 5 轨迹凹凸性与系统暂态稳定性

Fig.5 Concavity-convexity of trajectory and system transient stability

a. $l\Delta\omega<0$，轨迹位于凹区域，系统当前暂态稳定；

b. $l\Delta\omega>0$，轨迹位于凸区域，系统已经暂态不稳定；

c. $l\Delta\omega=0$，轨迹位于拐点处。

特性 **b** 即 $l\Delta\omega>0$ 可以作为电力系统暂态不稳定性判据，如可实时地获得电力系统发电机角度、角速度信息，然后对当前相点进行判断，只要检测到轨迹为凸特性(或由凹特性变为凸特性)，则可判别系统发生暂态失稳，否则认为系统当前暂态稳定，继续监测。

由图 5 可以看出，对于失稳的案例，系统失稳越快，轨迹与拐点曲线相交越早，判别出失稳的时刻越早，等值功角也越小，投入闭环控制措施越早，阻止暂态失稳的控制效果越好。这种自适应特性是基于轨迹凹凸性方法的独特优势。

3 基于响应的不稳定判据

对上述不稳定判据进行离散化处理，如式(9)所示。

$$l\Delta\omega=\frac{k(i)-k(i-1)}{\delta(i)-\delta(i-2)}\frac{\delta(i)-\delta(i-2)}{t(i)-t(i-2)}=\frac{k(i)-k(i-1)}{t(i)-t(i-2)}>0 \tag{9}$$

$$k(i)=\frac{\Delta\omega(i)-\Delta\omega(i-1)}{\delta(i)-\delta(i-1)}$$

其中，$i-1$ 为上次计算时刻；i 为本次计算时刻。一旦式(9)成立，由上面的分析即可判别出不稳定。

由于上式分母始终大于零，因此暂态不稳定判据离散表达形式等效成：

$$\tau=k(i)-k(i-1)>0 \tag{10}$$

不稳定指标 τ 的形式简单，运算量极小，仅仅与功角、角速度有关。基于响应的暂态稳定闭环控制流程如下。

a. 计算启动：根据可能造成暂态不稳定的大扰动电气量特征启动。

b. 读取数据：读入当前时刻测得的发电机功角和角速度信息，采样点的时间间隔为数据更新间隔(10~20 ms)。

c. 计算不稳定指标 τ：用式(10)计算。

d. 暂态不稳定判别：如果 $\tau<0$，可知轨迹位于凹区域，此时刻暂态稳定，则等待获得下一个采样点后进入步骤 **b**，进行下一时刻暂态不稳定性的判别；相反，如果 $\tau\geqslant0$，则说明轨迹已位于凸区域，说明系统若不控制则之后会暂态失稳，进入启动闭环控制环节，完成后返回步骤 **b** 继续监视、控制后续动态过程，直至系统稳定在新的平衡状态。

4 算例仿真

在 PSASP 仿真软件中搭建如图 1 所示系统，发电机采用经典的 E' 恒定模型，惯性常数取 8.1818 s，不考虑调速调压器作用，正常运行在功角 34.81°。将仿真计算暂态过程的每步角度、角速度结果作为本方案基于响应的测量输入，将仿真的最终结果与基于测量响应的判别结果进行比较。

4.1 系统发生简单故障的仿真

故障仿真过程为在 $t=0$ 时双回线的一回线首端发生永久性的三相短路故障，在不同的时间 t_c 跳开三相线路切除故障。基于响应的实时不稳定判别方案的判别与计算结果比较如表 1 所示。

表 1 三相短路故障后不同切除时刻下暂态稳定性判别结果

Tab.1 Results of transient stability identification for different cut-off time during three-phase short-circuit fault

故障切除时刻/s	实际结果	判出时刻/s	判断结果	判出时功角/(°)
0.100	稳定		稳定	
0.120	稳定		稳定	
0.130	稳定		稳定	
0.132	稳定		稳定	
0.133	不稳定	0.49	不稳定	119.5898
0.140	不稳定	0.41	不稳定	113.5010
0.150	不稳定	0.34	不稳定	107.7406
0.170	不稳定	0.30	不稳定	106.3572
0.200	不稳定	0.27	不稳定	104.7033
0.300	不稳定	0.33	不稳定	154.6766

表 1 的结果说明，本文的判别结果具有足够的准确性，故障切除时间相差 1 ms，临界稳定与不稳定可以得到正确区分；故障切除时间越长，造成的不稳定越严重，判出不稳定的时间越早。对于不同的潮流大小、故障地点、故障类型和切除时间，本文方法都能准确、快速判别稳定与不稳定(结果略)；按照本文不稳定判别结果得出的时刻，考虑一定的措施执行时间(100 ms)，投入控制后阻止不稳定发展的效果很好。

图 6 展示了表 1 中不同故障切除时刻下的相轨迹曲线，从内向外依次是 0.1 s、0.12 s、0.13 s、0.132 s 切除故障后的相轨迹，闭合的曲线说明系统稳定。发散的相轨迹从下往上依次是在 0.133 s、0.14 s、0.15 s、 0.17 s、0.2 s 和 0.3 s 切除故障后的相轨迹,其中实线表示本不稳定判别方案所用到的曲线,而虚线则是本次故障后系统仿真计算暂态过程发展的轨迹,实线和虚线的分界线处对应时刻为本方案获得不稳定结果的时刻。

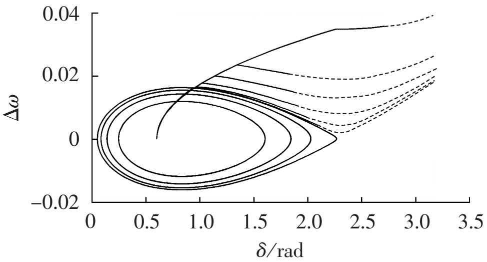

图 6　不同故障切除时刻下的相轨迹

Fig.6 Phase trajectory for different fault cut-off time

图 7 是系统发生三相故障在 0.132 s 切除后系统临界稳定与 0.133 s 切除后系统临界不稳定情况下不稳定指标 τ 的变化曲线。临界稳定情况下不稳定指标 τ 一直小于 0。而临界不稳定时,不稳定指标 τ 由负变为正值,该时刻即为判出不稳定的时刻,即为图中实线和虚线分界时间点,约为 0.49 s。虽然临界稳定的轨迹与临界失稳的轨迹在前期非常接近,但是越到后期差别越大,凹凸性指标仍然可以正确区分这 2 种情况。

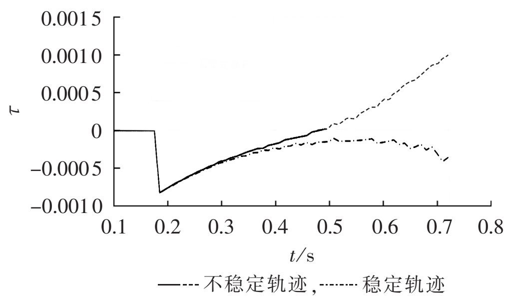

图 7　临界稳定及临时失稳情况下不稳定指标 τ 的变化曲线

Fig.7 Variation curve of instability index τ under critical stability and instability conditions

4.2　系统遭受多次大扰动的仿真

为了充分验证本方案的有效性,本文仿真了系统遭受多次冲击的场景,仿真算例选取了下面 3 种场景。

a. 在 t=0 时,双回线上的一回线首端发生三相短路故障,t=0.1 s 时保护切除该回线路,t=0.6 s 时重合闸动作,瞬时故障,重合成功。系统轻度摇摆后稳定运行。

b. 在 t=0 时,双回线上的一回线首端发生三相短路故障,t=0.1 s 时保护切除该回线路,t=0.6 s 时重合闸动作,重合于永久故障,t=0.62 s 时再度切除该回线路。系统重度摇摆后稳定运行。

c. 在 t=0 时,双回线上的一回线首端发生三相短路故障,t=0.1 s 时保护切除该回线路,t=0.6 s 时重合闸动作,重合于永久故障,t=0.65 s 时再度切除该回线路,系统最终不稳定。

3 种场景下的相轨迹曲线如图 8 所示,对于不稳定的场景 **c**,在 0.85 s 判出不稳定,此时功角为 115.5°。

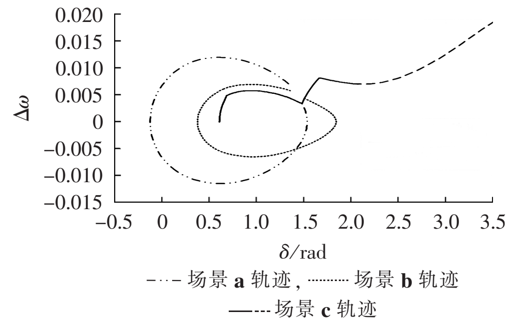

图 8　系统遭受多次扰动后的相轨迹

Fig.8 Phase trajectory of system with several disturbances

多次冲击作用都真实地反映在系统的实测轨迹上,利用实测的轨迹能准确地判断出系统的暂态稳定性,基于轨迹凹凸性的不稳定指标 τ 可以用于简单电力系统暂态不稳定性的实时判别,并且能适应遭受多次故障冲击的暂态过程。

5　结论

本文通过研究相平面中轨迹凹凸性的方向场,找到并证明了轨迹凹凸性和简单电力系统暂态稳定性的关系。基于这种关系,本文提出了反映轨迹凹凸性的不稳定指标 τ,该指标简单并且易于计算,基于此建立了简单电力系统暂态不稳定性实时判别方案,为暂态稳定性的闭环控制的启动奠定了理论基础。仿真结果表明本文提出的不稳定判据适应不同的故障类型以及多次故障冲击,能够准确、快速地识别出简单电力系统的暂态不稳定性,具有快速性和准确性。

致谢

参加该文成果研究的研究生达几十人,恕不能一一署名,在此致谢。

参考文献:

[1] 吕志来,张保会,哈恒旭. 电力系统暂态稳定紧急控制现状与展望[J]. 中国电力,1999,32(12):50-52.
LÜ Zhilai,ZHANG Baohui,HA Hengxu. Present state and prospect of power system transient stability emergency control [J]. Electric Power,1999,32(12):50-52.

[2] 徐泰山,许剑冰,鲍颜红,等. 互联电网预防控制和紧急控制在线预决策系统[J]. 电力系统自动化,2006,30(7):1-4.
XU Taishan,XU Jianbing,BAO Yanhong,et al. On-line pre-decision based preventive and emergency control system for interconnected power grids[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(7):1-4.

[3] FOUAD A A,KRUEMPEL K C,VITTAL V,et al. Transient

stability program output analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1986,1(1):2-8.

[4] 穆钢,王仲鸿,韩英铎,等. 暂态稳定性的定量分析——轨迹分析法[J]. 中国电机工程学报,1993,13(3):25-32.

MU Gang,WANG Zhonghong,HAN Yingduo,et al. A new method for quantitative assessment of the transient stability of power systems-trajectory analysis method[J]. Proceedings of the CSEE,1993,13(3):25-32.

[5] 穆钢,黎平. 关于轨迹分析方法在单机系统中有效性的仿真研究[J]. 电力系统自动化,1993,17(4):27-31.

MU Gang,LI Ping. Simulation studies on the validity of trajectory analysis method in OMIB system[J]. Automation of Electric Power Systems,1993,17(4):27-31.

[6] 穆钢. 关于轨迹分析方法中的稳定指标 S_1 在单机系统中性质的证明[J]. 电力系统自动化,1993,17(3):15-19.

MU Gang. Proof if some theorems on stability providing by the trajectory analysis method in an OMIB system[J]. Automation of Electric Power Systems,1993,17(3):15-19.

[7] 吕志来,张保会,哈恒旭. 基于 PMU 的电力系统暂态稳定实时快速预测的研究[J]. 继电器,2000,28(1):3-5.

LÜ Zhilai,ZHANG Baohui,HA Hengxu. Real-time transient stability prediction for multi-machine power system based on phasor measurement units[J]. Relay,2000,28(1):3-5.

[8] 吕志来,张保会,哈恒旭. 模糊子集和 Taylor 级数相结合的快速事故筛选方法[J]. 电力系统自动化,2000,24(22):16-20.

LÜ Zhilai,ZHANG Baohui,HA Hengxu. Integration of fuzzy set theory and Taylor series expansions for contingency screening of transient stability assessment[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(22):16-20.

[9] 吕志来,张保会,哈恒旭. 基于轨迹信息的暂态稳定裕度研究[J]. 电力自动化设备,2000,30(2):1-3.

LÜ Zhilai,ZHANG Baohui,HA Hengxu. Research on transient stability margin based on trajectory analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2000,30(2):1-3.

[10] 吕志来,张保会,哈恒旭. 基于改进的势能界面判据实时预测电力系统稳定性[J]. 中国电机工程学报,2002,22(4):95-100.

LÜ Zhilai,ZHANG Baohui,HA Hengxu. Real time fast predict transient stability based corrected potential surface criterion[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(4):95-100.

[11] 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 or convex of trajectory[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(5):38-42.

[12] 谢欢. 基于广域动态信息的电力系统暂态稳定性预测理论与技术研究[D]. 西安:西安交通大学,2008.

XIE Huan. Study on power system instability prediction theory and technology based on wide-area dynamic measurement information[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2008.

[13] 于广亮. 基于广域测量信息的发电机非线性反馈控制与闭环实时紧急控制研究[D]. 西安:西安交通大学,2008.

YU Guangliang. Wide-area measurement based nonlinear feedback control of a turbogenerator and closed loop real-time emergency control[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2008.

[14] 王绵森,马知恩. 工科数学分析基础[M]. 北京:高等教育出版社,1998:154-155.

[15] 韩茂安. 动力系统的周期解与分支理论[M]. 北京:科学出版社,2002:1-3.

[16] 夏道止. 电力系统分析[M]. 北京:中国电力出版社,2004:303-311.

作者简介:

张保会(1953-),男,河北魏县人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统安全稳定控制系统理论及装置、电力系统新型继电保护以及电力系统通信等(**E-mail**:bhzhang@mail.xjtu.edu.cn)。

Closed-loop control of power system transient stability(1):transient instability detection principle of simple power system

ZHANG Baohui,YANG Songhao,WANG Huaiyuan

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

Abstract: With the development of WAMS(Wide Area Measurement System),the trajectory of generator can be obtained in real time,which makes the closed-loop control of transient stability possible. The direction field near the inflection point curve on the angular velocity-power angle phase plane is researched and it is found and verified that,the system is transiently unstable when the trajectory of ideal generator enters the convex area from the concave area. An instability criterion simply expressed by the slope of phase trajectory and calculated in real time is proposed,which is used to initiate the stability control. A single-machine infinite-bus system is built in PSASP and the simulative results show that,the proposed instability criterion is fast and accurate,suitable for different system parameters,fault types and complicated multiple disturbances.

Key words: electric power systems; generator trajectory; convexity and concavity; transients; stability; control; instability criterion