

电力系统暂态稳定性闭环控制(三)——基于预测响应的暂态不稳定闭环控制启动判据

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: 尽管基于实时响应的不稳定判据可以快速启动稳定控制,但为了提高控制投入后阻止不稳定的效果、减小控制的代价,最好在必要时尽可能早地启动闭环控制。提出基于电力系统发电机实测轨迹的滚动预测未来轨迹的方法,使用预测轨迹判别暂态不稳定,并启动后续的稳定性的闭环控制。IEEE 10 机 39 节点系统和三华电网实际系统的仿真验证了该预测暂态不稳定后启动控制的准确性和快速性。

关键词: 电力系统; 预测响应; 暂态; 稳定性; 控制; 轨迹滚动预测

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.001

0 引言

电力系统暂态稳定闭环控制的目的是在系统遭受到不能够耐受的大扰动之后,以最小的控制代价维持系统的暂态稳定^[1]。系统是否遭受到了不能够耐受的大扰动识别问题,本系列文章(一)、(二)^[2-3]给出了准确的判别方法。但是以最小的控制代价维持系统的暂态稳定却与控制实施的快速性直接相关,扰动发生的同时投入控制措施控制效果最理想。然而这样却不能够充分发挥系统吸纳扰动的能力,没有控制的必要性识别,达不到最经济。如果能够根据获得的实测轨迹信息,准确地超实时预测到未来一段时间内的系统轨迹,然后根据预测轨迹的几何特征采用本系列文章(一)、(二)^[2-3]的不稳定性判别与后续文章控制决策方法,将能够很好地兼顾闭环控制的必要性、快速性以及控制代价最小的问题。

近年来,如何实现电力系统轨迹的准确预测是电力系统稳定分析领域的研究热点。文献[4]最早提出通过多项式逼近的方法实现对功角曲线的预测,并且提出采用修正因子对功角进行滚动预测,保证了预测功角有一定的准确性。文献[5-7]采用样条函数插值、三角函数拟合、自回归预测等数学方法进行发电机轨迹的预测。这些预测方法都是遵从功角是状态量不会突变的事实,其优点是不依赖于形成系统轨迹的模型和参数,仅仅根据当前的轨迹就可以预测未来一个时段的轨迹;缺点在于对电力系统的动力学系统特性发挥不足,预测的精度和时间长度不够理想。文献[8]利用广域测量系统(WAMS)稳态测量数据作为仿真计算的初始值,依据故障后各元件的机电暂态模型及参数,进行快速的仿真获

得轨迹。文献[9]尝试使用神经网络等人工智能方法预测系统的轨迹,存在训练样本巨大、训练过程难以收敛和外推能力差的缺陷。

文献[10]针对发电机的动力学系统特性,下时段功角的变化除了与上时段的功角有关之外,还与角速度、角加速度有关,基于自记忆函数的方法计及其高阶量变化的影响。数值仿真结果表明,这种功角曲线的预测方法具有精度高、稳定性好、预测时间长的优点。但是该文献没有对角速度的预测进行深入的研究。本文在此基础上给出了基于发电机微分方程的状态变量联合滚动预测方案,结合本系列文章(一)、(二)^[2-3]中提出的不稳定判别原理,发展了基于预测轨迹的暂态不稳定判别方案,加快了判别速度。

1 轨迹预测方法

对于多机电力系统,每台发电机的运动方程可以写作式(1)形式。

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_0 \Delta \omega_i \\ M_i \Delta \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei} - D_i \omega_0 \Delta \omega_i \end{cases} \quad (1)$$

其中, $i=1, 2, \dots, n$; δ_i 为发电机 i 的功角; ω_0 为同步角速度; $\Delta \omega_i$ 为发电机 i 的转子角速度偏差; M_i 为发电机 i 的惯性时间常数; P_{mi} 为机械输入功率, P_{ei} 为电磁输出功率, $\Delta P_i = P_{mi} - P_{ei}$ 称为不平衡功率; D_i 为阻尼因子,近似认为 $D_i=0$ 。

在广域测量系统中,功角 δ_i 、角速度偏差 $\Delta \omega_i$ 和不平衡功率 ΔP_i 可以通过实时测量获得,其中 δ_i 二阶连续可微, $\Delta \omega_i$ 一阶连续可微, ΔP_i 代表了角加速度,在系统发生网络切换时刻可以突变,但是在非网络切换时刻它是连续的。

自记忆预测是从微分方程出发,通过与一个记忆函数作内积,将历史数据提供的信息反映到微分

方程中,在计算中表现出良好的稳定性和精度^[5-7,10]。它适用于具有如下形式的微分动力系统:

$$\frac{dx}{dt} = F(x, t) \quad (2)$$

其中, $x \in \mathbf{R}^n$ 为 n 维动力系统的状态量; F 为系统状态量对时间的微分方程。

当应用于电力系统发电机功角预测时,按照自记忆方法的三阶预测公式,发电机功角预测如式(3)所示^[11]:

$$\delta_{i+1} = \beta_{-2}(\delta_{i-2} - \delta_{i-1} + 2\omega_{i-2}\Delta t) + \beta_{-1}(\delta_{i-2} - \delta_i + 2\omega_{i-1}\Delta t) + \beta_0(\delta_{i-1} + 2\omega_i\Delta t)\delta_i\beta_1 \quad (3)$$

每次预测需要用到之前 3 个数据点的信息,既能保证计算的快速性,也能保证预测结果的准确性。式(3)中的 β_i 可以采用最小二乘法拟合^[12-13],其拟合公式为:

$$\beta = (\alpha^T \alpha)^{-1} \alpha^T \delta_i = [\beta_{-2} \quad \beta_{-1} \quad \beta_0 \quad \beta_1] \quad (4)$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} \delta_{i-3} - \delta_{i-2} + 2\Delta\omega_{i-3}\Delta t \\ \delta_{i-3} - \delta_{i-1} + 2\Delta\omega_{i-2}\Delta t \\ \delta_{i-2} + 2\Delta\omega_{i-1}\Delta t \\ \delta_{i-1} \end{bmatrix}$$

需要指出的是,在式(3)中,预测未来时刻的功角时需要用到对应时刻的角速度的值,这并不是已知的,而是经过预测获得的。虽然角速度和不平衡功率的关系也符合式(2)中的导数关系,但是由于轨迹的不平衡功率并不是一个连续的函数,因此采用自记忆的方法进行角速度预测的效果反而不是最好的。通过大量仿真发现,角速度随时间变化的曲线具有低频拟周期的特性,因此可以采用三角函数拟合的方法滚动预测角速度信息。

角速度拟合的公式为:

$$\Delta\omega(t) = \Delta\omega_c(t) + \lambda_{1\omega}(t)\sin t + \lambda_{2\omega}(t)\cos t \quad (5)$$

其中, $\Delta\omega_c(t)$ 、 $\lambda_{1\omega}(t)$ 和 $\lambda_{2\omega}(t)$ 为拟合 t 时刻角速度偏差 $\Delta\omega(t)$ 所用到的公式辨识参数,也可以采用最小二乘法拟合获得,拟合公式与式(4)相似。

$$\lambda = (A^T A)^{-1} A^T \Delta\omega = [1 \quad \lambda_{1\omega}(t) \quad \lambda_{2\omega}(t)]^T \quad (6)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \sin t_i & \cos t_i \\ 1 & \sin t_{i-1} & \cos t_{i-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \sin t_{i-n} & \cos t_{i-n} \end{bmatrix}$$

$$\Delta\omega = \begin{bmatrix} \Delta\omega_i \\ \Delta\omega_{i-1} \\ \vdots \\ \Delta\omega_{i-n} \end{bmatrix}$$

对于计及调速器和励磁调节器的非自治多机系统而言,等值的不平衡功率轨迹曲线同样具有低频拟周期性质,因此可以通过三角函数拟合。预测公式为:

$$\Delta P(t) = P_c(t) + \lambda_{1P}(t)\sin t + \lambda_{2P}(t)\cos t \quad (7)$$

其中, $P_c(t)$ 、 $\lambda_{1P}(t)$ 和 $\lambda_{2P}(t)$ 为拟合 t 时刻不平衡功率 $\Delta P(t)$ 所用到的公式辨识参数,可以采用最小二乘法拟合,形式同式(6)。

$$\lambda = (A^T A)^{-1} A^T \Delta P = [1 \quad \lambda_{1P}(t) \quad \lambda_{2P}(t)]^T \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \sin t_i & \cos t_i \\ 1 & \sin t_{i-1} & \cos t_{i-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \sin t_{i-n} & \cos t_{i-n} \end{bmatrix}$$

$$\Delta P = \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta P_{i-1} \\ \vdots \\ \Delta P_{i-n} \end{bmatrix}$$

就某一确定时刻的系统运行状态而言,只要系统中不发生大的网络操作或其他大扰动,参数在短时间内可当成定常不变,即只需要用最小二乘法辨识一次参数,之后认为它们保持恒定,仿真表明该方法可以准确预测未来 0.4 s 的轨迹。

2 实时滚动预测方案

自记忆预测可以较准确地预测未来下一时段(约 0.4 s)的功角、角速度,随着暂态过程的进展,数据不断更新,用最新的实时数据滚动预测未来的轨迹,步骤如下。

a. 获取当前系统状态量数据,检测是否有网络切换,如果有,则计数器清零。检测计数器,判别已获得的数据样点量是否足够(至少需要 4 组样点的数据),如果不够,则等待下一时刻数据读入,直到所需数据量足够,则开始本次滚动预测。

b. 根据角速度和不平衡功率信息,利用最小二乘法根据式(6)和式(8)识别预测角速度和不平衡功率的参数。

c. 按照式(5)和式(7)对下一时刻的角速度和不平衡功率进行预测。

d. 根据之前的功角和角速度信息,按照式(4)利用最小二乘法识别预测功角的参数。

e. 根据当前的实测数据,用式(3)预测下一点的功角值。

f. 判断预测时间是否达到预定时长,若否,则转步骤 d;若是,则结束本次滚动预测。

该预测方案考虑了功角的高阶信息,对于时变性能不强的系统,理论上其预测结果必然更加准确,如图 1 所示的理想单机无穷大系统,其轨迹预测见图 2(图中角速度偏差、不平衡功率为标么值,后同)。可见在 0.1~0.2 s 的时段内预测轨迹与实测轨迹基本重合,随着预测时间的变长,预测轨迹与实测轨迹有了较明显的偏差,根据判别精度与控制速度的要

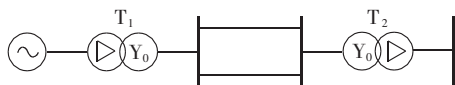
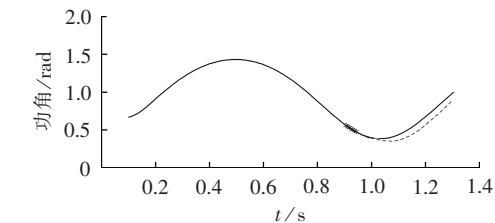
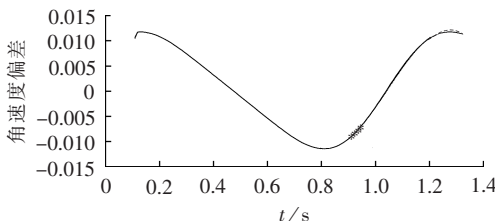


图 1 简单系统示意图

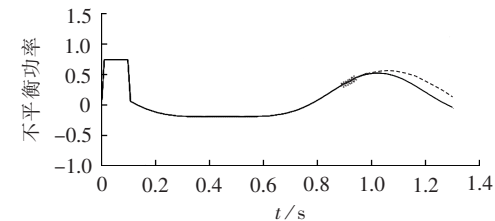
Fig.1 Schematic diagram of simple power system



(a) 功角



(b) 角速度偏差



(c) 不平衡功率

— 实测轨迹, ---- 预测轨迹, * 预测采用数据点

图 2 简单系统预测曲线

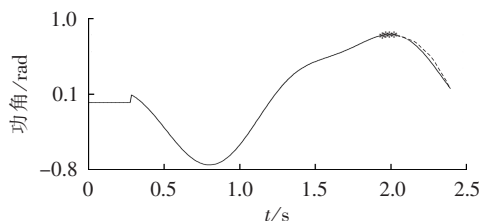
Fig.2 Predicted curves of simple power system

求,灵活给定预测时长。并且本文提出的预测方案能够准确地预测功角、角速度和不平衡功率的变化趋势,见图 2(b)、(c),即使采用上升段的数据也可以预测到未来下降的趋势。在预测时长 0.3 s 时,预测轨迹的功角与实测轨迹功角相差不超过 4° ,该时长足够完成执行控制。

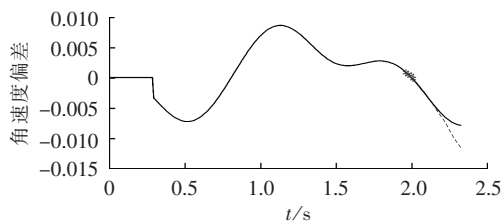
需要指出的是,对于多机系统而言,由于时变的非自治影响,预测的精度在不同情况下差别较大,大量仿真结果表明预测的时长在 0.3 s 之内,其功角的最大误差小于 5° ,多机系统的预测轨迹曲线如图 3 所示。

3 基于预测响应和实时响应的暂态稳定闭环控制启动方案

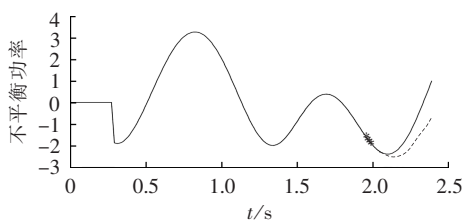
对于造成不稳定发展越快的大扰动,其轨迹预测的精度越高,越需要更快地投入控制,使用预测轨迹对系统暂态稳定性进行超实时的判别;根据实测响应的暂态稳定判别对于临界不稳定具有更好的准



(a) 功角



(b) 角速度偏差



(c) 不平衡功率

— 实测轨迹, ---- 预测轨迹, * 预测采用数据点

图 3 多机系统预测曲线

Fig.3 Predicted curves of multi-machine power system

确性;结合两者的优点,依据本系列文章(二)^[3]提出的多机系统暂态不稳定性判据,构建出基于预测响应和实测响应的暂态不稳定性识别方案,将其作为闭环紧急控制系统的启动判据,其具体流程如下所示。

- a. 大扰动启动条件满足。
- b. 读入当前时刻各发电机的功角、角速度和不平衡功率信息。
- c. 判别功角间隙差,若不大于门槛则认为此时系统稳定,回到步骤 b;否则,实时分群。
- d. 对已被分群的系统进行等值计算,获得等值系统的功角、角速度和不平衡功率信息。
- e. 启动本文提出的轨迹滚动预测方案,获取未来 0.3 s 内的预测轨迹。
- f. 若等值轨迹的功角大于门槛值转步骤 g;否则转步骤 b。
- g. 分别计算实测轨迹当前点及预测时段内逐点轨迹的不稳定指标 τ 和 μ 曲线。
- h. 判定系统当前时刻及预测的未来时段内稳定性,以上二者判别结果全为稳定返回到步骤 b;反之启动后续紧急控制方案^[14]。

步骤 c 的设置是提高分群等值的可靠与必要性,步骤 f 的设置是基于超前失稳功角大于一定值

的事实,角度设定门槛值避免在极小角度时的可能误判。

4 算例仿真

为了验证提出的基于预测响应的多机电力系统暂态不稳定性实时监测方案,本文在 IEEE 标准 39 节点系统和三华实际电网中做了大量的仿真,仿真结果验证了该方案的可行性。

4.1 简单电力系统

在接线图如图 1 所示的简单电力系统^[15]中,同本系列文章(一)^[2]一样,在双回线的一回上发生三相接地短路故障,然后在 t_c 时刻切除故障线路,改变故障切除时间 t_c 可以获得不同的相轨迹,同时系统的稳定性也不同。通过仿真可知该故障的临界切除时间 t_{cl} 是 0.13 s。通过 PSASP 的仿真计算,获得故障发生后 0~5 s 内系统发电机 δ 、 $\Delta\omega$ 、 ΔP 等状态量数据,数据采集的时间间隔选择为 10 ms。将 PSASP 仿真数据作为实测数据输入称为实测轨迹,根据实测数据进行轨迹滚动预测,称为预测轨迹,比较仿真结果、实测轨迹、预测轨迹的暂态稳定性判别结果,如表 1 所示。

在简单电力系统中,由于轨迹预测有较高的预测精度,使得暂态不稳定性的判别速度得到了明显的改善,暂态不稳定的判别精度有保证。尤其是在临界失稳情况下,判稳时间提前了 0.33 s,判稳功角从 119° 提前到了 61°,这对后续实施紧急控制有着极其重要的意义。

4.2 IEEE 39 节点系统

IEEE 标准 39 节点系统的接线图如图 4 所示。该系统有 10 台发电机组,发电机采用 E'_q 恒定模型,自带调压器、调速器和 PSS,可见这是一个多机的非自治电力系统。

同本系列文章(一)^[2]一样,仿真中设置了 3 种故障,其中故障 1 设置为母线 4 和母线 14 之间发生三相接地短路故障,故障 2 设置为母线 3 和母线 18

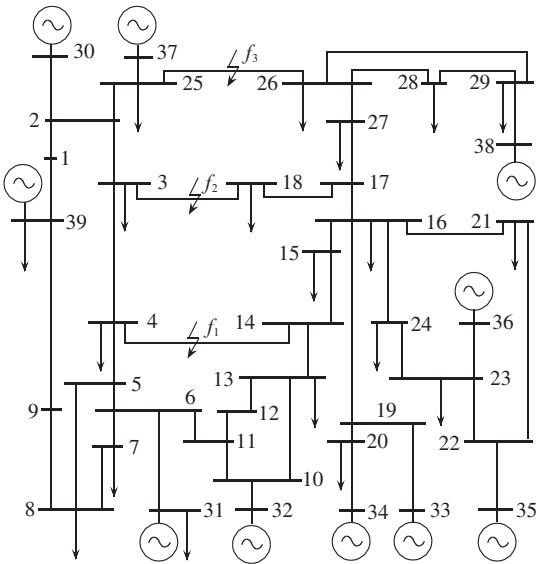


图 4 IEEE 39 节点系统接线图

Fig.4 Wiring diagram of IEEE 39-bus system

之间发生三相接地短路故障,故障 3 设置为母线 25 和母线 26 之间发生三相接地短路故障,3 种情况下系统均在 t_c 时刻切除故障。通过仿真可以获得故障 1 的临界切除时间 $t_{cl,1}$ 为 0.19 s,故障 2 的临界切除时间 $t_{cl,2}$ 为 0.29 s,故障 3 的临界切除时间 $t_{cl,3}$ 为 0.28 s。

表 2—4 是比较仿真结果、实测轨迹、预测轨迹的暂态稳定性判别结果。

根据表 2—4 可以看出,基于预测响应的暂态不稳定性判别速度快于实测轨迹,具有一定自适应的特性,即越恶劣的状况判断速度越快。需要注意的是,由于预测轨迹与实测轨迹存在偏差,在系统处于临界稳定时预测轨迹会发生误判。根据快速性与精确性的取舍,在工程实际中可以使用基于预测轨迹的方法作为闭环控制的启动判据,这种情况下,虽然发生误判,但是控制量计算的结果较小,切机量不大,不会造成很大的损失,而且实施控制措施后会使得系统远离临界运行状态,提高了系统的稳定裕度。

表 1 基于预测响应的简单电力系统暂态稳定性识别方案仿真结果

Table 1 Simulative results of transient stability identification based on predicted response of simple power system

t_c/s	系统仿真 稳定情况	基于预测轨迹判稳方案			基于实测轨迹判稳方案		
		方案判定结果	判定失稳的时刻/s	判定失稳角度/(°)	方案判定结果	判定失稳的时刻/s	判定失稳角度/(°)
0.100	稳定	稳定			稳定		
0.120	稳定	稳定			稳定		
0.130	稳定	稳定			稳定		
0.132	稳定	稳定			稳定		
0.133	不稳定	不稳定	0.16	61	不稳定	0.49	119
0.140	不稳定	不稳定	0.17	64	不稳定	0.41	113
0.150	不稳定	不稳定	0.18	67	不稳定	0.34	107
0.170	不稳定	不稳定	0.20	75	不稳定	0.30	106
0.200	不稳定	不稳定	0.23	89	不稳定	0.27	104
0.300	不稳定	不稳定	0.33	148	不稳定	0.34	154

表 2 基于预测响应的多机系统暂态稳定性识别方案在 IEEE 39 节点系统中的仿真结果(故障 1)

Table 2 Simulative results of transient stability identification based on predicted response of multi-machine power system for IEEE 39-bus system(fault 1)							
t_c/s	系统仿真 稳定情况	基于预测轨迹判稳方案			基于实测轨迹判稳方案		
		方案判定结果	判定失稳的时刻/s	判定失稳角度/(°)	方案判定结果	判定失稳的时刻/s	判定失稳角度/(°)
0.15	稳定	稳定			稳定		
0.16	稳定	稳定			稳定		
0.17	稳定	稳定			稳定		
0.18	稳定	稳定			稳定		
0.19	稳定	不稳定	0.38	117.413	稳定		
0.20	不稳定	不稳定	0.36	118.205	不稳定	0.38	121.264 5
0.21	不稳定	不稳定	0.35	119.642	不稳定	0.35	119.642 1
0.22	不稳定	不稳定	0.35	122.553	不稳定	0.35	122.553 0
0.23	不稳定	不稳定	0.34	122.919	不稳定	0.34	122.919 9
0.25	不稳定	不稳定	0.29	85.172	不稳定	0.33	124.447 6
0.30	不稳定	不稳定	0.33	130.391	不稳定	0.34	134.341 2
0.33	不稳定	不稳定	0.36	144.702	不稳定	0.37	149.099 5
0.35	不稳定	不稳定	0.38	154.831	不稳定	0.39	159.552 9

表 3 基于预测响应的多机系统暂态稳定性识别方案在 IEEE 39 节点系统中的仿真结果(故障 2)

Table 3 Simulative results of transient stability identification based on predicted response of multi-machine power system for IEEE 39-bus system(fault 2)							
t_c/s	系统实际 稳定情况	基于预测轨迹判稳方案			基于实测轨迹判稳方案		
		方案判定结果	判定失稳的时刻/s	判定失稳角度/(°)	方案判定结果	判定失稳的时刻/s	判定失稳角度/(°)
0.25	稳定	稳定			稳定		
0.26	稳定	稳定			稳定		
0.27	稳定	稳定			稳定		
0.28	稳定	不稳定	0.32	92.653 6	稳定		
0.29	稳定	稳定			稳定		
0.30	不稳定	不稳定	1.11	170.051 4	不稳定	1.12	170.938 4
0.33	不稳定	不稳定	0.43	109.900 2	不稳定	0.53	126.879 0
0.35	不稳定	不稳定	0.42	117.447 8	不稳定	0.44	113.855 1

表 4 基于预测响应的多机系统暂态稳定性识别方案在 IEEE 39 节点系统中的仿真结果(故障 3)

Table 4 Simulative results of transient stability identification based on predicted response of multi-machine power system for IEEE 39-bus system(fault 3)							
t_c/s	系统实际 稳定情况	基于预测轨迹判稳方案			基于实测轨迹判稳方案		
		方案判定结果	判定失稳的时刻/s	判定失稳角度/(°)	方案判定结果	判定失稳的时刻/s	判定失稳角度/(°)
0.20	稳定	稳定			稳定		
0.25	稳定	稳定			稳定		
0.26	稳定	稳定			稳定		
0.27	稳定	不稳定	0.38	94.630 3	稳定		
0.28	不稳定	不稳定	0.32	86.353 7	不稳定	0.37	94.210 2
0.29	不稳定	不稳定	0.33	88.448 0	不稳定	0.37	95.036 1
0.30	不稳定	不稳定	0.34	90.588 5	不稳定	0.37	95.755 5
0.33	不稳定	不稳定	0.36	95.318 1	不稳定	0.37	97.278 9

5 结论

本文针对系统状态量各自的特点,引入了符合电力系统物理意义的能够体现动力学微分方程原理的轨迹滚动预测方法,使得轨迹预测的精度较好、时段较长。将预测轨迹与实测轨迹联合应用,判别多机系统暂态稳定性,对于暂态不稳定判出的速度更快,为后续实施闭环控制赢得了更多时间。

参考文献:

[1] 张保会. 电网继电保护与实时安全性控制面临的问题与需要开

展的研究[J]. 电力自动化设备,2004,24(7):1-6.
ZHANG Baohui. Problems on protection relay & urgency control system in interconnected power network of China and studies needed[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(7): 1-6.
[2] 张保会,杨松浩,王怀远. 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[J]. 电力自动化设备,2014, 34(8):1-6.
ZHANG Baohui,YANG Songhao,WANG Huaiyuan. Closed-loop control of power system transient stability(1):transient instability detection principle of simple power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):1-6.
[3] 张保会,杨松浩,王怀远. 电力系统暂态稳定性闭环控制(二)——

- 多机电力系统暂态不稳定判别原理[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 1-6.
- ZHANG Baohui, YANG Songhao, WANG Huaiyuan. Closed-loop control of power system transient stability(2): transient instability detection principle of multi-machine power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 1-6.
- [4] 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.
- [5] 李国庆, 孙福军, 任强. 基于外部观测的电力系统暂态稳定性实时预测和控制方法[J]. 电网技术, 1995, 19(1): 17-22.
- LI Guoqing, SUN Fujun, REN Qiang. Real time prediction and control method for transient stability of multi-machine power system based on outside observation[J]. Power System Technology, 1995, 19(1): 17-22.
- [6] 宋方方, 毕天姝, 杨奇迹. 基于 WAMS 的电力系统受扰轨迹预测[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(23): 27-31.
- SONG Fangfang, BI Tianshu, YANG Qixun. Perturbed trajectory predictions method based on wide area measurement systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(23): 27-31.
- [7] 徐英, 夏世威, 毛安家, 等. 基于 WAMS 预测轨迹的 IEEAC 等值[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 31-34.
- XU Ying, XIA Shiwei, MAO Anjia, et al. IEEAC method based on the WAMS predicting trajectory[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 31-34.
- [8] 李琰, 周孝信, 周京阳. 基于新增虚拟节点的系统受扰轨迹预测[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(12): 19-22.
- LI Yan, ZHOU Xiaoxin, ZHOU Jingyang. The perturbed trajectories prediction based on an additional virtual node[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(12): 19-22.
- [9] 周伟, 陈允平. 自组织映射神经网络用于暂态稳定性分析的研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(15): 33-38.
- ZHOU Wei, CHEN Yunping. Self-Organizing Mapping(SOM) neural networks for power system transient stability assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(15): 33-38.
- [10] 谢欢, 张保会, 郝治国. 基于电力系统同步多参量测量的自记忆轨迹预测算法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 1-5.
- XIE Huan, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo. Self-memory prediction based on synchronous measurement of power system multi-variable[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(5): 1-5.
- [11] 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.
- [12] 束洪春, 孙士云, 孙向飞. 暂态稳定视角下的重合时序整定策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 1-6.
- SHU Hongchun, SUN Shiyun, SUN Xiangfei. Setting strategy of reclose sequence in view of transient stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 1-6.
- [13] 于光亮. 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] 宋兆欧, 刘俊勇, 刘友波, 等. 计及动态修正的自适应广域低频减载[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 95-100.
- SONG Zhaoou, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. WAMS-based adaptive UFLS considering dynamic correction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 95-100.
- [15] 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(3): initiation criterion of transient stability closed-loop control based on predicted response of power system

ZHANG Baohui, YANG Songhao, WANG Huaiyuan

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

Abstract: Though the instability criterion based on the real-time response of power system can quickly initiate the stability control, it is better to start the closed-loop control as soon as possible for improving the control effect and reducing the control cost. A scheme of rolling trajectory prediction based on the measured trajectory of generator in power system is proposed, which, ahead of time, detects the transient instability according to the predicted trajectory and initiates the subsequent stability closed-loop control. Simulations for IEEE 10-generator 39-bus system and actual Sanhua Grid demonstrate the correctness and rapidity of the proposed scheme.

Key words: electric power systems; predicted response; transients; stability; control; rolling trajectory prediction