

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.03.010

基于主导轨迹断面阻尼比灵敏度的仿真关键参数诊断

李峰, 彭慧敏, 李威, 袁虎玲, 鲍颜红

(南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106)

摘要:电力系统机电暂态仿真中,励磁、调速、电力系统稳定器(PSS)等控制系统参数不合理,易引起控制系统稳定性弱化,导致仿真可信度降低。基于轨迹断面阻尼比灵敏度指标,提出一种机电暂态仿真中控制系统关键参数的实用诊断方法。由仿真中各控制系统的输出变量振荡特性确定主导断面时刻、主导发电机及其对应控制系统,针对主导断面时刻和主导发电机进行单机无穷大(OMIB)等值后,经阻尼比灵敏度分析给出参数调整建议,多个算例验证了所提方法的有效性。该法是轨迹特征根思想的一种工程应用,结合数值积分提供的控制系统振荡信息与平衡点特征根技术提供的阻尼比灵敏度解析信息,可快速定位不合理的控制系统参数,适用于复杂多机系统的参数诊断。

关键词:机电暂态仿真;控制系统;参数诊断;轨迹特征根;阻尼比灵敏度

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)03-0067-07

0 引言

机电暂态仿真是电力系统安全稳定分析与控制的基础。仿真中的励磁、调速、电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)等控制系统的模型和参数对仿真结果正确与否至关重要^[1-3]。研究表明不同的控制系统模型和参数,仿真结果相差很大。在仿真中自动诊断控制系统结构和参数对系统稳定性的影响,具有重要研究意义。

灵敏度分析广泛用于控制系统参数诊断,主要有平衡点特征根对控制系统参数灵敏度的分析方法和轨迹灵敏度分析方法。文献[4]首次提出多回路系统的平衡点特征根对控制元件参数的灵敏度计算方法。文献[5]开发了特征值及其阻尼比对PSS参数灵敏度的计算功能,并说明了PSS参数灵敏度在互联电力系统工程中的应用。轨迹灵敏度采用数值积分法求取系统的受扰轨迹,基于对动态积分方程求参数的偏导获取参数轨迹灵敏度^[6-7]。文献[8]通过轨迹灵敏度仿真得到目标函数的梯度信息,应用共轭梯度技术优化多个PSS参数,目标函数考虑了电力系统大扰动中的非线性特征。文献[9]通过比较任意摄动参数在微分代数方程动态解的泰勒展开多项式中的系数,获得求取电力系统动态灵敏度的方程,分析了励磁系统参数对系统动态过程的影响。文献[10]提出了基于轨迹灵敏度的动态等值模型参数分类优化方法,文献[11]通过

轨迹灵敏度分析,采用暂态稳定测度指标来检验参数对暂态稳定性的影响程度,文献[12]提出基于轨迹灵敏度矩阵的参数可辨识性分析方法。

平衡点特征根对控制系统参数的灵敏度难以准确分析复杂电力系统中控制参数对动态过程的影响,而以数值积分为基础的轨迹灵敏度计算,通过求取参数相对于某个状态量或者代数量的动态灵敏度进行分析,状态量或者代数量的选择需结合所分析的系统稳定问题而定,且无相关解析信息,要比较分析实际大电网所有控制系统的参数影响,不仅计算量庞大,而且需要更为专业的分析能力。

结合平衡点特征根与数值积分的轨迹断面特征根方法^[13-17],将平衡点特征根技术扩展到大扰动受扰轨迹的各个断面,可利用相关解析信息分析复杂时变非线性电力系统。

文中针对机电暂态仿真中励磁、调速、PSS等控制系统参数不合理(例如在线计算时参数录入错误,参数整定异常等),提出基于主导轨迹断面阻尼比灵敏度的仿真关键参数诊断方法,该法是轨迹特征根思想的一种工程应用。

1 轨迹断面阻尼比灵敏度指标

在平衡点特征根分析中,一个重要的物理性质就是特征根对参数变化的灵敏度,可反映各个参数变化引起特征根变化的大小,从而为参数诊断提供信息。文中根据轨迹特征根方法^[16],在机电暂态仿真每个积分步断面上,按照参变量的实际值修正对应时段的线性化方程,并用常规算法求解断面特征根灵敏度。

收稿日期:2018-12-13;修回日期:2019-01-18

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目“大电网仿真收敛性能诊断方法研究”

具体地,对任意多机模型积分后,沿其受扰轨迹在每一步积分的起点处,按积分得到的第 i 步积分步长起点处的系统实际状态 S_i ($i=1,2,3,\dots,n$, n 为仿真时间内总计算步数),将非自治非线性系统模型重新线性化,得到标准的线性化系统状态方程 $\dot{X}_i = A_i X_i$, X_i 为全系统增量形式的状态变量矢量, A_i 为系统的状态矩阵。对状态矩阵 A_i 进行特征根分析,计算得到第 i 个系统状态 S_i 下的特征根 $\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$ 。根据特征根灵敏度计算公式(1),计算第 i 个系统状态 S_i 下待考察控制系统参数 α 的特征根灵敏度 $\partial\lambda_i/\partial\alpha$ 。

$$\frac{\partial\lambda_i}{\partial\alpha} = \frac{v_i^T \frac{\partial A_i}{\partial\alpha} u_i}{v_i^T u_i} = \frac{\partial\sigma_i}{\partial\alpha} + j \frac{\partial\omega_i}{\partial\alpha} \quad (1)$$

v_i 和 u_i 分别为 λ_i 的左右特征向量,阻尼比 $\xi_i = -\sigma_i/\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}$ 表示振荡模式随振荡次数的衰减,对控制系统参数 α 的灵敏度指标为^[11-12]:

$$\begin{cases} \frac{\partial\xi_i}{\partial\alpha} = \frac{\partial\xi_i}{\partial\sigma_i} \frac{\partial\sigma_i}{\partial\alpha} + \frac{\partial\xi_i}{\partial\omega_i} \frac{\partial\omega_i}{\partial\alpha} \\ \frac{\partial\xi_i}{\partial\sigma_i} = -\omega_i^2(\sigma_i^2 + \omega_i^2)^{3/2} \\ \frac{\partial\xi_i}{\partial\omega_i} = \sigma_i\omega_i(\sigma_i^2 + \omega_i^2)^{3/2} \end{cases} \quad (2)$$

该指标综合了特征根实部和虚部,用于参数诊断更为简明。将所有积分步断面的控制系统参数 α 的阻尼比灵敏度按时间绘制成曲线,即得到阻尼比灵敏度的轨迹。阻尼比灵敏度大于零,则增大参数 α 可以提高振荡模式阻尼比,反之亦然。

复杂多机系统的强时变非线性因素可能会导致不同断面时刻特征根分析的主导振荡模式不同,根据不同的振荡模式计算的阻尼比灵敏度差异可能较大,因模式不同会出现各断面参数阻尼比灵敏度不一致的问题,难以选择影响稳定性较大的参数集合。将轨迹断面阻尼比灵敏度指标应用于实际多机系统仿真参数诊断,需结合仿真过程信息确定主导轨迹断面和主导振荡模式。

2 机电仿真中控制系统关键参数诊断

文献[15]采用扩展等面积准则(extended equal area criterion, EEAC)方法推导了轨迹断面特征根的解析估算公式,仿真 t 时刻特征根实部和虚部见式(3)和式(4)。

$$\sigma_t = -\frac{\frac{M_a}{M_s} D_{s,t} + \frac{M_s}{M_a} D_{a,t}}{2(M_s + M_a)} \quad (3)$$

$$\omega_t = \left[\left(\frac{k_{ss,t}}{M_s} + \frac{k_{aa,t}}{M_a} \right) \omega_0 - \sigma_t^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中:EEAC 将系统全部受扰轨迹分解为互补的两群,即领前群(S)和余下群(A); M_s 和 M_a 分别为领前群和余下群惯量和; $D_{s,t}$ 和 $D_{a,t}$ 分别为领前群和余下群仿真 t 时刻的阻尼。而仿真 t 时刻的系数 $k_{ss,t}$ 和 $k_{aa,t}$ 计算如下:

$$k_{ss,t} = \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j}(0) \frac{\Delta \delta_i}{\Delta \delta_s} \quad (5)$$

$$k_{aa,t} = \sum_{i \in A} \sum_{j \in A} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j}(0) \frac{\Delta \delta_i}{\Delta \delta_A} \quad (6)$$

式中: P 和 δ 分别为发电机电磁功率和功角,详细公式说明参见文献[15]。由估算公式可知,仿真 t 时刻的机组电磁功率与功角的偏导越大,或机组功角相对初始值的偏移越大,机组功角曲线振荡越剧烈,估算的 ω 越大,其阻尼特性越差。为此,可根据仿真中各时间断面相关发电机控制系统的输出变量振荡特性,确定主导不稳定的控制系统和发电机及主导轨迹断面。为避免多机系统复杂模式的干扰,可针对该断面时刻主导发电机单机无穷大(OMIB)等值后的主导模式,进行参数阻尼比灵敏度分析,快速定位关键控制参数或不合理控制系统参数。

控制系统参数诊断流程见图1,具体诊断及调整步骤如下:

(1) 根据仿真中发电机所属控制系统(调速器、原动机、励磁系统和 PSS)的输出变量从故障清除时刻到现在的波形的振荡特性,判断是否出现弱阻尼振荡或者增幅振荡情况,如出现,则满足启动条件,进一步筛选确定主导机组。具体方法为,在各积分时步,计算输出变量的方差和均值之比 $D(y_n)$ (y 为各输出变量, n 为各积分时步),当 $D(y_n)$ 大于设定值时,选择其中最大者控制系统 C 为影响系统动态的主导因素,同时确定控制系统 C 所属的发电机 G 为影响系统动态的主导发电机。继续计算后续时步的 $D(y_n)$,达到峰值时确定提取断面轨迹的 T_1 时刻,输出 T_1 时刻的系统状态(代数变量和状态变量的实际值);

(2) 以发电机 G 为端口,向输电网内看,将 T_1 时刻的系统等值为发电机 G 通过等值阻抗与无穷大母线相连接的单机无穷大系统 S^[19],无穷大母线用惯量极大的二阶发电机模型模拟,对主导发电机进行单机 OMIB 等值。

(3) 按照已经计算得到的在 T_1 时刻的发电机 G 及其控制系统的状态变量值,将单机无穷大系统 S

线性化,并对单机无穷大系统 S 进行特征根分析。根据计算得到的振荡模式特征量组,依据振荡频率、阻尼比及相关比,依据能量最大原则,选择振荡模式 M 为主导振荡模式,计算控制系统 C 所有参数在该模式 M 下的阻尼比灵敏度 φ ,分析主导机组控制器参数的阻尼比灵敏度指标。

(4) 比较控制系统 C 所有参数在模式 M 下的阻尼比灵敏度,确定阻尼比灵敏度绝对值最大者为要调整的关键参数 α 。根据参数 α 的阻尼比灵敏度正负建议参数调整方向(阻尼比灵敏度大于零,则增大参数,阻尼比灵敏度小于零,则减小参数);

(5) 在参数 α 原值基础上按设定步长调整控制参数(为避免多次反复修改,目前根据工程经验设置,取时间常数调整步长为 0.1,比例系数调整步长为 1),验证建议调整效果。

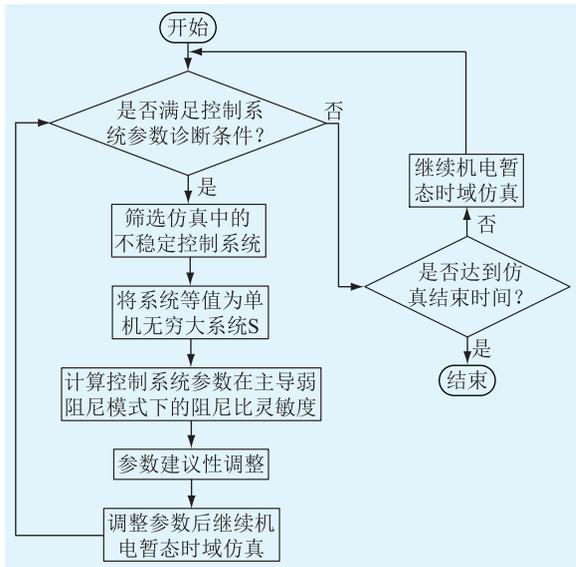


图1 控制系统参数诊断流程

Fig.1 Control system stability diagnosis method flow

3 简单多机系统诊断分析

构建振荡模式并不复杂的简单多机系统,在机电暂态仿真过程中按步长 0.1 s 输出各轨迹断面的系统实际状态,对各轨迹断面状态进行特征根分析,说明轨迹断面阻尼比灵敏度指标在各振荡模式下的特性。

3.1 系统描述

图 2 为三机测试系统初始潮流呈对称分布,机组 G_1 、 G_2 和 G_3 有功、无功出力一致,负荷节点 5、6、8 有功无功一致。除机组 G_2 的发电机动能小于 G_1 和 G_3 外,3 台机组的稳定参数完全一致。

机组 G_2 和 G_3 配置有相同的自励静止励磁系统,模型如图 3 所示,参数见表 1,起主要调控作

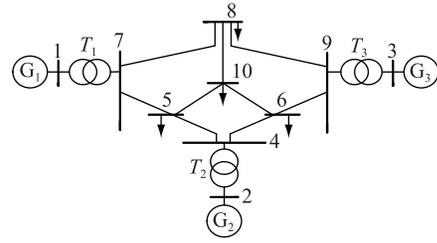


图2 三机测试系统

Fig.2 3 machine test system

用的参数为调控环节时间常数 T_A 和控制增益 K_A 。0 周波时,在母线 10 发生三相金属短路,0.1 s 时故障清除,仿真时间 5 s。

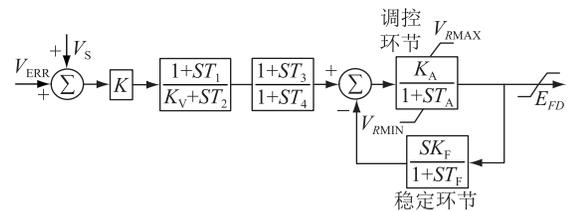


图3 自励静止励磁系统

Fig.3 The model of the self-excited excitation

表 1 励磁系统参数

参数	数值	参数	数值
K	400	T_4	1.0
K_V	1.0	T_A	1.0
T_1	1.0	T_F	1.0
T_2	1.5	K_A	1.0
T_3	1.0	K_F	0.0

3.2 阻尼比灵敏度轨迹分析

系统存在 2 个典型的振荡模式,模式 I 是发电机 G_2 相对于发电机 G_1 和 G_3 ,振荡频率为 1.0 Hz;模式 II 是发电机 G_3 相对于发电机 G_1 ,振荡频率为 0.68 Hz。一次时域仿真结束后,对发电机功角曲线进行 Prony 分析得到振荡模式特征量组,依据能量最大原则,识别该仿真时段的主导模式为模式 II^[20]。

发电机 G_2 和 G_3 的励磁控制系统参数 T_A 和 K_A 在模式 I 和模式 II 下的轨迹断面阻尼比灵敏度相对于实数 0 的二阶距 φ_α 见表 2。

表 2 轨迹断面阻尼比灵敏度二阶距 φ_α

Table 2 Secondary moment of trajectory damping ratio sensitivity

模式	$G_2(T_A)$	$G_2(K_A)$	$G_3(T_A)$	$G_3(K_A)$
I	8.821 86×10 ⁻⁶	1.991 37×10 ⁻⁵	1.306 98×10 ⁻⁷	4.503 62×10 ⁻⁷
II	0.006 659 994	0.005 088 318	0.025 960 446	0.025 579 635

由表 2 可见:主导模式 II 中各参数的轨迹断面

阻尼比灵敏度相对于实数 0 的二阶距 φ_α 明显大于模式 I 中各参数 φ_α 。即根据时段主导模式计算轨迹断面阻尼比灵敏度比采用其他模式计算更有效。

模式 II 中发电机 G_3 各参数的轨迹断面阻尼比灵敏度相对于实数 0 的二阶距 φ_α 明显大于发电机 G_2 的各参数 φ_α , 而模式 I 中发电机 G_2 各参数的轨迹断面阻尼比灵敏度相对于实数 0 的二阶距 φ_α 明显大于发电机 G_3 的各参数 φ_α 。即同一模式中, 参与因子较大机组的控制参数轨迹断面阻尼比灵敏度更大。

图 4 和图 5 为仿真过程中各模式下参数阻尼比灵敏度轨迹变化曲线。由图可知: 参数 T_A 和 K_A 对稳定性影响的权重非常接近, 二者对系统阻尼的影响效果相反。在同一模式中, 各轨迹断面的参数阻尼比灵敏度具有一致性。如模式 I 中影响稳定性较大的参数集合始终是发电机 G_2 的控制参数 (T_A 和 K_A), 而模式 II 中始终是发电机 G_3 的控制参数。但是各轨迹断面的参数阻尼比灵敏度的正负方向可能会随时间变化。

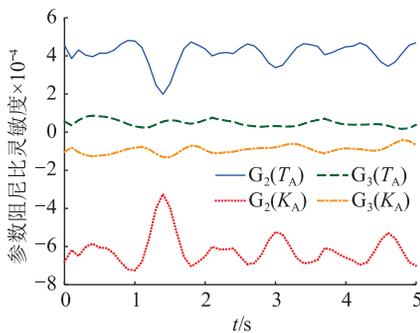


图 4 模式 I 下参数阻尼比灵敏度轨迹
Fig.4 Parameter damping ratio sensitivity trajectory in mode 1

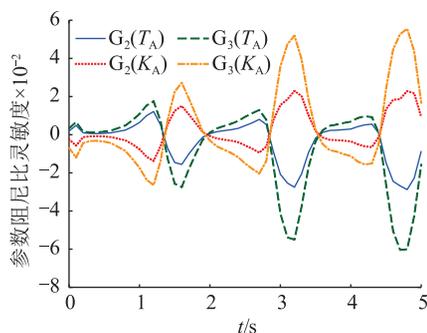


图 5 模式 II 下参数阻尼比灵敏度轨迹
Fig.5 Parameter damping ratio sensitivity trajectory in mode 2

3.3 与传统轨迹灵敏度分析比较

有学者提出传统轨迹灵敏度分析方法, 通过研究系统的动态响应参数或初始条件等的灵敏度

来定量分析参数对动态品质的影响^[4-5]。

图 6 和图 7 分别为发电机励磁控制系统参数 T_A 和 K_A 相对于自身机组功角的参数自灵敏度轨迹和相对于对方机组功角的互灵敏度轨迹。图中, 发电机 G_3 功角和发电机 G_2 功角对发电机 G_3 各参数的灵敏度均要高于对发电机 G_2 各参数的灵敏度。参数 T_A 和 K_A 对系统稳定性影响的权重十分接近, 对功角轨迹的影响效果相反, 与基于阻尼比灵敏度轨迹的分析结论一致。但是该方法要比较分析实际大电网所有控制系统的参数影响, 计算量过于庞大, 且需要更为专业的分析能力。

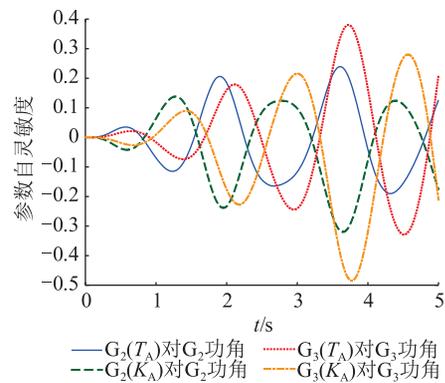


图 6 参数自灵敏度轨迹

Fig.6 Self-sensitivity trajectory of parameter

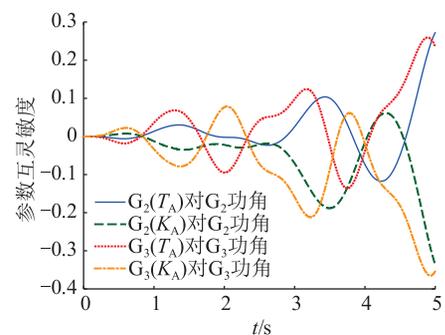


图 7 参数互灵敏度轨迹

Fig.7 Multi-sensitivity trajectory of parameter

3.4 参数调整建议分析

确定关键参数为不合理参数时(如在线部分参数录入错误), 可以给出控制参数调整建议。

根据阻尼比灵敏度轨迹分析和传统轨迹灵敏度分析结论, 发电机 G_3 的励磁系统参数对稳定性的影响要大于发电机 G_2 的励磁系统参数对稳定性的影响。

同方向同比例调整 G_2 和 G_3 的励磁系统参数 T_A 后进行电力系统机电暂态时域仿真, 图 8 为系统主导模式中发电机 G_1 相对于发电机 G_3 的功角曲线对比。调整 G_3 参数 T_A 后, 发电机 G_1 相对 G_3 的

功角曲线振荡幅度明显好于调整 G_2 参数 T_A 。

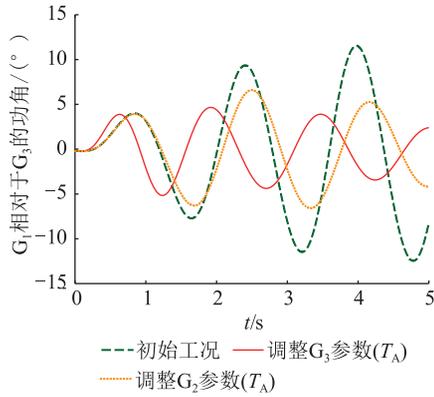


图8 发电机 G_2 和 G_3 参数调整后对比
Fig.8 Contrast of generator G_2 and G_3 parameter adjustment

同理,同方向同比例增大 G_3 的励磁系统参数 T_A 和 K_A 后进行电力系统机电暂态时域仿真,图9为系统主导模式中发电机 G_1 相对于发电机 G_3 的功角曲线对比。相比于初始工况,增大 T_A 改善系统稳定性,而增大 K_A 恶化系统稳定性。

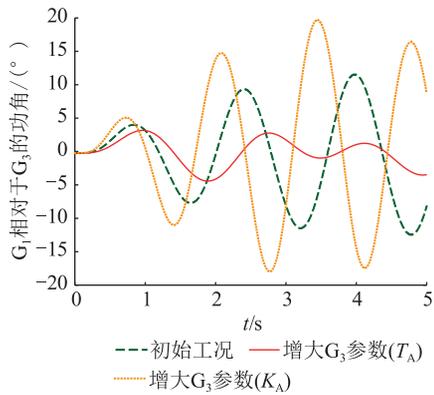


图9 发电机 G_3 参数 T_A 和 K_A 调整后对比
Fig.9 Contrast of generator G_3 parameter T_A and K_A adjustment

4 实际多机系统诊断

实际复杂多机系统中,根据主导轨迹断面阻尼比灵敏度进行控制系统参数诊断,以应对复杂振荡模式和减少计算量。采用第2节方法,以某实际区域电网数据为例分析。构造不合理参数,设置某励磁控制系统参数 $T_A=0.001$,并忽略数据检查。

根据文中提出的控制系统稳定性诊断及参数调整方法,仿真到 3.5 s 后,依据 $D(y_n)$ 大于设定门槛值,可以判断出沪新宝机组的励磁控制系统呈现增幅振荡趋势,主导机组为沪新宝机组。

进一步输出仿真 3.5 s 时刻的系统状态(代数变量和状态变量的实际值),对主导机组进行单机

OMIB 等值、特征值分析和控制器参数阻尼比灵敏度指标分析。

其中仿真过程中沪新宝近区沪新宝机组发电机功角曲线如图 10 所示。沪新宝机组的励磁系统采用图 3 模型,参数见表 3,系统主导振荡模式信息见表 4,该模式下参数 T_A 和 K_A 的阻尼比灵敏度分别为 0.203 39 和 -0.006 86。

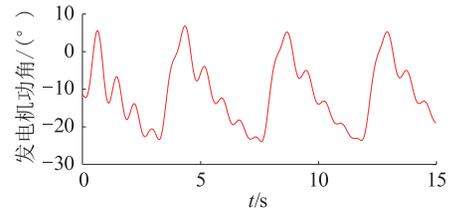


图 10 仿真过程中沪新宝近区发电机功角曲线
Fig.10 Power angle curve of the generator in the near area of Huxinbao

表 3 沪新宝机组励磁系统参数

Table 3 Excitation system parameters of Huxinbao

参数	数值	参数	数值
K	72	T_4	0.16
K_V	0	T_A	0.001
T_1	0.4	T_F	0.1
T_2	0.4	K_A	1.0
T_3	0.14	K_F	0.2

表 4 振荡信息

Table 4 Oscillation information

实部	虚部	频率/Hz	阻尼比	相关比
-0.242	7.956	1.266	0.030 4	8.431

根据阻尼比灵敏度指标,可以确定关键参数为 T_A ,且增大 T_A 可以提高动态稳定性。采用摄动法,摄动步长 0.1,可以确定参数 T_A 增大至 0.101 时沪新宝机组的励磁电流和功角曲线均趋于平稳。为方便比较,图 11 和图 12 将参数调整前后沪新宝机组的励磁电流和功角曲线置于同一图例中。

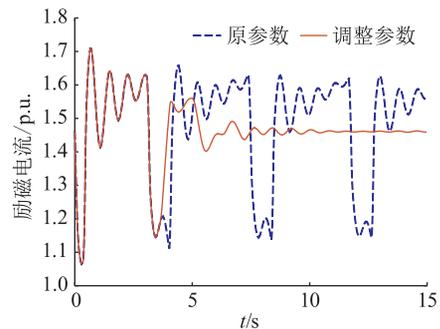


图 11 参数调整前后励磁电流曲线
Fig.11 Excitation current curve before and after parameter adjustment

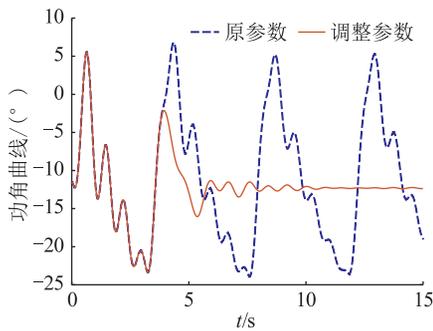


图 12 参数调整前后功角曲线

Fig.12 Angle curve curve before and after parameter adjustment

由图可知,仿真到 3.5 s 识别确定关键参数,对关键参数调整后,励磁电流和功角曲线均趋于平稳,动态稳定性明显提高。

方法若应用于实际在线参数诊断,考虑到在线前后两轮数据断面运行方式改变不大(5 min 计算一轮),一种可行的调整方案是:在本轮计算中获取从仿真开始到主导断面被识别时间窗口的主导振荡模式及关键控制参数,在下轮计算开始前,通过特征值分析匹配上一轮识别的主导振荡模式,根据关键控制参数的阻尼比灵敏度正负确定调整方向,经确认后,进行关键参数的相应调整。

5 结论

文中针对机电暂态仿真中励磁、调速、PSS 等控制系统参数不合理,提出基于主导轨迹断面阻尼比灵敏度的仿真关键参数诊断方法。该法是轨迹特征根思想的一种工程应用,与传统方法相比具有以下特点:

(1) 根据数值积分中各时间断面相关控制系统的输出变量振荡特性,确定参数诊断的主导轨迹断面和主导振荡模式,可显著减小计算量,提高方法可靠性;

(2) 采用特征根技术中的参数阻尼比灵敏度解析指标,可直接反映各个参数变化引起阻尼比变化的大小,易于定位关键控制参数;

(3) 方法适用于实际复杂多机系统,进一步可推广至在线系统的关键参数诊断,有助于提高仿真可信度。

参考文献:

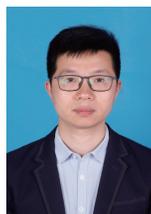
[1] 李兆伟, 吴雪莲, 庄侃沁, 等. “9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 149-155.
LI Zhaowei, WU Xuelian, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of east china grid after bipolar locking of 9.19 Jinping-Sunan DC transmission line[J].

Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 149-155.

- [2] 张俊峰, 李鹏, 苏寅生, 等. 励磁系统调差系数优化整定存在的风险分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 141-145.
ZHANG Junfeng, LI Peng, SU Yinsheng, et al. Risk analysis on optimization and setting for system reactive current compensation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 141-145.
- [3] 徐春雷, 徐瑞, 仇晨光, 等. 发电机组一次调频在线测试与 AGC 性能考核系统设计[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3): 1-6.
XU Chunlei, XU Rui, QIU Chenguang, et al. Evaluation system design of online test of primary frequency regulation and AGC performance for generator unit [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3): 1-6.
- [4] VAN NESSJE, BOYLEJM, IMADFP. Sensitivity of large multiple-loop systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1965, 10(7): 308-315.
- [5] 史慧杰, 陈陈, 陈迅, 等. 基于灵敏度分析的电力系统稳定器参数优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 15-19.
SHI Huijie, CHEN Chen, CHEN Xun, et al. Power system stabilizer parameters optimization based on sensitivity analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 15-19.
- [6] LAUFENBERG M J, PAI M A. A new approach to dynamic security assessment using trajectory sensitivities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(3): 953-958.
- [7] HISKENS I A, PAI M A. Trajectory sensitivity analysis of hybrid systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2000, 47(2): 204-220.
- [8] 周保荣, 房大中, 孙景强. 基于轨迹灵敏度分析的电力系统稳定器参数优化设计[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 20-23.
ZHOU Baorong, FANG Dazhong, SUN Jingqiang. Tuning of PSS parameters using optimization approach based on trajectory sensitivity analysis [J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 20-23.
- [9] 马进, 王景钢, 贺仁睦. 电力系统动态仿真的灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 20-27.
MA Jin, WANG Jinggang, HE Renmu. Sensitivity analysis of power system dynamic simulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 20-27.
- [10] 周海强, 张琦兵, 顾康慧. 基于轨迹灵敏度的动态等值模型参数分类优化方法[J]. 电力建设, 2015, 36(8): 29-33.
ZHOU Haiqiang, ZHANG Qibing, GU Kanghui. A trajectory sensitivity-based dynamic equivalent model parameters optimization method [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(8): 29-33.
- [11] 左煜, 李欣然, 宋军英. 应用暂态稳定测度指标的参数灵敏度分析方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(12): 77-82.
ZUO Yu, LI Xinran, SONG Junying. Method for parameter sensitivity analysis of the transient stability measurement index application [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2016, 28

- (12):77-82.
- [12] 刘兴杰,闫亮. 基于轨迹灵敏度的励磁系统参数可辨识性分析[J]. 电力系统自动化,2019,43(1):209-214.
LIU Xingjie, YAN Liang. Parameter identifiability analysis of excitation system based on trajectory sensitivity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(1):209-214.
- [13] 张鹏飞, 薛禹胜, 张启平. 电力系统时变振荡特性的小波脊分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 32-35.
ZHANG Pengfei, XUE Yusheng, ZHANG Qiping. Power system time-varying oscillation analysis with wavelet ridge algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 32-35.
- [14] 薛禹胜, 潘学萍, ZHANG Guorui, 等. 计及时变系统完整非线性的振荡模式分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 1-7.
XUE Yusheng, PAN Xueping, ZHANG Guorui, et al. Oscillation mode analysis including full nonlinearity of timevarying systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2008, 32(18): 1-7.
- [15] 潘学萍, 薛禹胜, 张晓明, 等. 轨迹特征根的解析估算及其误差分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 10-14.
PAN Xueping, XUE Yusheng, ZHANG Xiaoming, et al. Analytical calculation of power system trajectory eigenvalues and its error analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 10-14.
- [16] 薛禹胜, 郝思鹏, 刘俊勇, 等. 关于低频振荡分析方法的评述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 1-8.
XUE Yusheng, HAO Sipeng, LIU Junyong, et al. A review of analysis methods for low-frequency methods[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 1-8.
- [17] 郝思鹏, 薛禹胜, 唐茂林, 等. 通过轨迹特征根分析时变振荡特性[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 1-5.
HAO Sipeng, XUE Yusheng, TANG Maoling, et al. Trajectory eigenvalue analysis time variant oscillation analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 1-5.
- [18] 尹波, 庞松龄, 杨眉. 基于阻尼灵敏度指标的 PSS 参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 28-32.
YIN Bo, PANG Songling, YANG Mei. Optimization of PSS parameters based on damping sensitivity indices [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 28-32.
- [19] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. McGraw-Hill, 1993.
- [20] 徐伟, 鲍颜红, 徐泰山, 等. 电力系统低频振荡实时控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 98-101.
XU Wei, BAO Yanhong, XU Taishan, et al. Real-time control of power system low-frequency oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 98-101.

作者简介:



李峰

李峰(1981),男,硕士,高级工程师,从事电力系统分析与控制工作(E-mail:lifengwx@163.com);

彭慧敏(1972),男,博士,高级工程师,从事电力系统分析与控制工作;

李威(1976),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力系统分析与控制工作。

Simulation parameter diagnosis based on the dominant trajectory section damping ratio sensitivity

LI feng, PENG Huimin, LI Wei, YUAN Huling, BAO Yanhong

(NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

Abstract: Unreasonable excitation, speed regulation, PSS and other control system parameters in electromechanical transient simulation of power system will lead to the weakening of control system stability and the reduction of simulation credibility. A practical diagnostic method for this problem is presented based on the dominant trajectory section damping ratio sensitivity. The dominant time section, the dominant generator and its corresponding control system are determined automatically by the output variable oscillation characteristics of each control system in the simulation. After the single-machine infinite (OMIB) equivalent is performed for the dominant time section and the dominant generator, the suggestion of parameter adjustment is given by the sensitivity analysis of damping ratio. The effectiveness of the proposed method is verified by several examples. This method is an engineering application of the idea of trajectory eigenvalue. In combination with the oscillation information of the control system provided by numerical integration and the damping ratio sensitivity analytical information provided by eigenvalue technology, unreasonable control system parameters can be quickly located. It is suitable for parameter diagnosis of complex multi-machine system.

Keywords: electromechanical transient simulation; control system; parameter diagnosis; trajectory eigenvalue; damping ratio sensitivity

(编辑 方晶)