

电力系统动态仿真的灵敏度分析

马 进, 王景钢, 贺仁睦

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京市 102206)

摘要: 电力系统动态仿真既是电力系统动态安全分析与控制的基本工具, 也是电网调度部门指导电力生产的主要依据, 因此, 动态仿真的准确程度直接关系到电力系统的安全经济运行。然而电力系统是高维、多变量的复杂非线性系统, 影响其仿真可信度的因素众多, 因此分析电力系统动态过程对参数、特别是对控制器参数的灵敏度尤为重要。文中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, 解决了参数奇异点处的灵敏度计算问题。并进一步对方程的动态特性, 特别是对电力系统控制器参数的灵敏度进行了讨论。依据所提出的方法, 以单机对无穷大系统与 IEEE 10 机 39 节点系统为例, 计算了 IEEE-EA 型励磁系统参数对系统动态过程的影响, 并对其动态特征进行了分析。

关键词: 电力系统; 动态仿真; 灵敏度分析

中图分类号: TM743

0 引言

电力系统是高维、强非线性的复杂动态系统, 其运行稳定性是电能安全生产的重要问题。长期以来, 电力系统动态仿真不但是电力系统动态安全分析与控制的基本工具, 而且成为电网调度部门确定电网运行方式、指导电力生产的主要依据。因此, 电力系统动态仿真的准确程度直接关系到系统的安全经济运行。

我国的一次能源主要集中在西部, 而负荷中心集中在经济发达的东部地区, 开发西部能源并实施西电东送是我国能源开发战略方针之一, 西电东送将促使全国电网的互联。而电力系统仿真的可信度将直接影响到互联电网电能的输送能力。研究表明, 不同模型和参数的仿真结果相差很大, 甚至对系统稳定水平的评价截然相反^[1]。另一方面, 电力系统动态仿真也是电力系统动态控制器设计的基础, 而电力系统动态控制器的性能直接影响到互联电网在异常情形下的动态行为。如果电力系统动态仿真不是系统动态的真实镜像, 那么依此所设计的动态控制器不但无法达到预期效果, 而且很可能对系统动态稳定产生不良影响。在 1996 年美国西部大停电事故中, 由于 PSS 控制器的参数基于不符合实际的负荷模型仿真整定, 导致系统增幅振荡失稳^[2]。

基于 PMU 的广域测量系统在电力系统应用之前, 由于整个电网缺乏统一时标下动态响应数据的测量, 阻碍了对电力系统仿真可信度的研究。20 世纪 90 年代, 美国西部系统逐渐形成了基于 PMU 的广域测量系统, 为开展电力系统动态仿真可信度的研究奠定了数据基础。1996 年 8 月 10 日美国西部大停电后, BPA (Bonneville 电力局) 用 WSCC 指导运行的模型与参数库进行仿真计算, 所得仿真结果与实际情况大相径庭, 仿真可信度的研究引起广泛重视。我国对仿真可信度的研究与国际同步, 1998 年我国学者就提出了动态仿真可信度研究的思想, 并对研究框架、研究方法进行了初步探索^[3~5]。

电力系统是多变量的复杂非线性系统, 影响电力系统动态仿真可信度的因素众多, 因此分析电力系统动态过程对电力系统参数的灵敏度尤为重要。文献[6]发展了计算电力系统动态灵敏度的伴随方程方法; 文献[7]提出了一种求得 EEAC 提供的不稳定情况下多刚体运动系统稳定量化指标对控制参数的解析灵敏度的方法; 文献[8]提出了电力系统轨迹灵敏度的分析方法; 文献[9~11]进一步将其推广到混杂动态系统的轨迹灵敏度分析; 文献[12]运用轨迹灵敏度的分析方法估算故障的临界切除时间; 文献[13]基于轨迹灵敏度计算了稳定裕度对参数的灵敏度。但是目前所提出的轨迹灵敏度的方法都是基于对动态积分方程求参数的偏导而获得, 无法处理参数奇异点处的灵敏度计算。并且已有的动态灵敏度分析主要是从暂态稳定分析的角度出发, 分析网络参数或故障切除时间对系统稳定性的影响, 然而, 系统动态过程对控制器参数的灵敏度对于电力

收稿日期: 2005-03-28。

国家重点基础研究发展计划专项资助项目 (2004CB217901); 华北电力大学校内基金资助项目 (Dr2004-11)。

系统动态仿真可信度的研究也尤为重要。

本文提出了一种分析电力系统动态灵敏度的方法,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,解决了参数奇异点处的灵敏度计算问题。并进一步对方程的动态特性,特别是对电力系统控制器参数的灵敏度进行了讨论。依据所提出的方法,以单机对无穷大系统与 IEEE 10 机 39 节点系统为例,计算了 IEEE-EA 型励磁系统参数对系统动态过程的影响,并对其动态特征进行了讨论。

1 电力系统动态仿真的灵敏度方程

设表征电力系统动态的微分代数方程为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}, \mathbf{u}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 是状态变量,包括发电机功角、转子角速度、 q 轴暂态电势以及控制器的动态变量等; $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^m$ 是代数变量,如母线电压、相角等; $\mathbf{p} \in \mathbf{R}^l$ 是系统参数,如线路阻抗、电力系统控制器参数; $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^q$ 是控制输入。

考虑状态反馈控制输入 $\mathbf{u} = \mathbf{k}(\mathbf{x})$, 设满足方程(1)的解为: $\mathbf{x}(t, \mathbf{p})$, 显然, 系统的动态轨线依赖于动态系统参数 \mathbf{p} 。则

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t, \mathbf{p}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t, \mathbf{p}), \mathbf{y}, \mathbf{p}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}(t, \mathbf{p}), \mathbf{y}, \mathbf{p}) \end{cases} \quad (2)$$

假设某一个参数 p_i 在初始参数 p_{i0} 处有一微小摄动 ϵ , 其他参数保持恒定, 即 $p_i = p_{i0} + \epsilon$, 并记:

$$\mathbf{v}(p_i) = \mathbf{v}(p_{i0} + \epsilon) = \dot{\mathbf{x}}(t, \mathbf{p})$$

$$\mathbf{F}(p_i) = \mathbf{F}(p_{i0} + \epsilon) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t, \mathbf{p}), \mathbf{y}, \mathbf{p})$$

$$\mathbf{G}(p_i) = \mathbf{G}(p_{i0} + \epsilon) = \mathbf{g}(\mathbf{x}(t, \mathbf{p}), \mathbf{y}, \mathbf{p})$$

则动态微分代数方程(2)可以写为:

$$\begin{cases} \mathbf{v}(p_{i0} + \epsilon) = \mathbf{F}(p_{i0} + \epsilon) \\ \mathbf{0} = \mathbf{G}(p_{i0} + \epsilon) \end{cases} \quad (3)$$

将方程(3)在参数 p_{i0} 处至二阶泰勒展开, 则有:

$$\begin{cases} \mathbf{v}(p_{i0}) + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial p_i} \bigg|_{p_i=p_{i0}} \epsilon + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial p_i^2} \bigg|_{p_i=p_{i0}} \epsilon^2 = \\ \mathbf{F}(p_{i0}) + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial p_i} \bigg|_{p_i=p_{i0}} \epsilon + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \mathbf{F}}{\partial p_i^2} \bigg|_{p_i=p_{i0}} \epsilon^2 \\ \mathbf{0} = \mathbf{G}(p_{i0}) + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial p_i} \epsilon + \frac{\partial^2 \mathbf{G}}{\partial p_i^2} \frac{\epsilon^2}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)就将微分代数动态方程化为关于参数 p_i 摄动量 ϵ 的代数多项式。根据代数多项式的恒等原则, 关于 ϵ 同次幂项的系数应该相等, 则有:

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial p_i} \bigg|_{p_i=p_{i0}} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial p_i} \bigg|_{p_i=p_{i0}} \\ \mathbf{0} = \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial p_i} \bigg|_{p_i=p_{i0}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial p_i^2} \bigg|_{p_i=p_{i0}} = \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \mathbf{F}}{\partial p_i^2} \bigg|_{p_i=p_{i0}} \\ \mathbf{0} = \frac{\partial^2 \mathbf{G}}{\partial p_i^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial p_i} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial p_i} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial p_i} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial p_i} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial p_i} = \frac{\partial \dot{\mathbf{x}}(t, p_i)}{\partial p_i} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{x}(t, p_i)}{\partial p_i} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial p_i} = \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial p_i} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial p_i} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial p_i} \quad (9)$$

若记 $\mathbf{S} = \frac{\partial \mathbf{x}(t, \mathbf{p})}{\partial p_i}$, 将式(7)~式(9)代入代数

方程(5), 则有:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{S}} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{S} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial p_i} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial p_i} \\ \mathbf{0} = \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{S} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial p_i} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial p_i} \end{cases} \quad (10)$$

若矩阵 $\partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{y}$ 非奇异, 则微分代数方程(10)可以进一步简化为:

$$\dot{\mathbf{S}} = \left[\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} - \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \left(\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \right] \mathbf{S} + \left[\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial p_i} - \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \left(\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial p_i} \right] \quad (11)$$

求解方程(11)就可以获得状态变量 $\mathbf{x}(t, p_i)$ 相对参数 p_i 的灵敏度。值得指出的是, 虽然方程(11)与直接将微分代数方程(2)对参数 p_i 求偏导数所得运算结果在形式上相同, 但是在很多参数的奇异点处, 实际上并不能够进行偏导数的运算, 这点在计算动态过程对控制器参数的灵敏度时尤为突出。例如对于控制系统中常见的一阶惯性环节的时间常数, 当其为 0 时, 惯性环节所对应的动态方程即从系统动态方程(1)中消失, 所对应的系统阶数则相应由 n 阶降为 $n-1$ 阶。而方程(3)~方程(5)将灵敏度计算问题转化为参数摄动变量 ϵ 的代数方程, 从而通过比较摄动变量 ϵ 在多项式中相应的系数, 来求取参数奇异点处动态变量相对于该参数的灵敏度。

如果记:

$$\begin{cases} \mathbf{A}(t) = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} - \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \left(\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \\ \mathbf{B}(t) = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial p_i} - \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \left(\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial p_i} \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11), 有

$$\dot{\mathbf{S}} = \mathbf{A}(t) \mathbf{S} + \mathbf{B}(t) \quad (13)$$

所以灵敏度方程是一个线性时变方程, 其中时变矩阵 $\mathbf{A}(t)$ 恰是原微分代数动态方程(2)的降维雅可比矩阵; 而且不同控制器的参数仅影响线性时变方程(13)的强迫解。进一步分析表明, 在求取系统动态变量相对于控制器参数的灵敏度时, 由于网络

代数方程约束中往往不含控制器的参数,因此在计算动态变量对控制器参数的灵敏度时,有

$$\frac{\partial f}{\partial y} \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial p_i} = 0$$

矩阵 $B(t)$ 可以进一步简化为:

$$B(t) = \frac{\partial f}{\partial p_i} \quad (14)$$

由代数方程(6),记 $\hat{S} = \partial^2 x(t, p_i) / \partial p_i^2$, 经类似推导,可得系统动态变量相对于参数的二阶灵敏度计算方程为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{S}} = \frac{\partial f}{\partial x} \hat{S} + \left[\frac{\partial}{\partial p_i} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) \right] S + \\ \quad \left[\frac{\partial}{\partial p_i} \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right) \right] \frac{\partial y}{\partial p_i} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{\partial^2 y}{\partial p_i^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial p_i^2} \\ 0 = \left[\frac{\partial}{\partial p_i} \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right) \right] S + \frac{\partial g}{\partial x} \hat{S} + \\ \quad \left[\frac{\partial}{\partial p_i} \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right) \right] \frac{\partial y}{\partial p_i} + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{\partial^2 y}{\partial p_i^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial p_i^2} \end{cases} \quad (15)$$

若矩阵 $\partial g / \partial y$ 非奇异,则方程(15)可以简化为微分方程:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{S}} = & \left[\frac{\partial f}{\partial x} - \frac{\partial f}{\partial y} \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial x} \right] \hat{S} + \left[\frac{\partial}{\partial p_i} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) - \right. \\ & \left. \frac{\partial f}{\partial y} \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right)^{-1} \frac{\partial}{\partial p_i} \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right) \right] S + \left[\frac{\partial}{\partial p_i} \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right) - \right. \\ & \left. \frac{\partial f}{\partial y} \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right)^{-1} \frac{\partial}{\partial p_i} \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right) \right] \frac{\partial y}{\partial p_i} \end{aligned} \quad (16)$$

考虑到系统动态变量对控制器参数灵敏度的特性,在求取系统动态对控制器参数的灵敏度时,方程(16)可以进一步简化为:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{S}} = & \left[\frac{\partial f}{\partial x} - \frac{\partial f}{\partial y} \left(\frac{\partial g}{\partial y} \right)^{-1} \frac{\partial g}{\partial x} \right] \hat{S} + \left[\frac{\partial}{\partial p_i} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) \right] S + \\ & \left[\frac{\partial}{\partial p_i} \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right) \right] \frac{\partial y}{\partial p_i} + \frac{\partial^2 f}{\partial p_i^2} \end{aligned} \quad (17)$$

联立求解式(10)与式(17),可以求得在控制器参数的奇异点处,系统动态变量对控制器参数的二阶灵敏度。更高阶的动态变量对控制器参数的灵敏度计算可以依照前述计算过程,通过比较代数方程(3)对应参数摄动值 ϵ 更高阶项的系数来进行。

2 单机对无穷大系统动态变量对励磁系统参数的灵敏度分析

图1给出了单机对无穷大系统的单线结构图^[14]。发电机采用 IEEE-EA 型励磁系统^[15],如图2所示。

假设线路2在 $t=1$ s 时发生瞬时三相短路故障,故障持续时间 50 ms,图3所示为发电机的功角曲线,图4所示为发电机功角对励磁系统参数的灵敏度曲线。

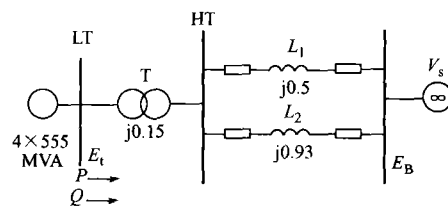


图1 单机对无穷大系统单线图
Fig. 1 One-machine infinite bus system

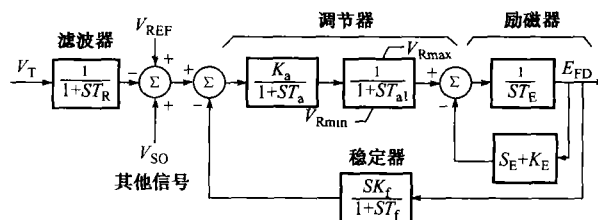


图2 IEEE-EA 型励磁系统
Fig. 2 IEEE-EA type excitation system

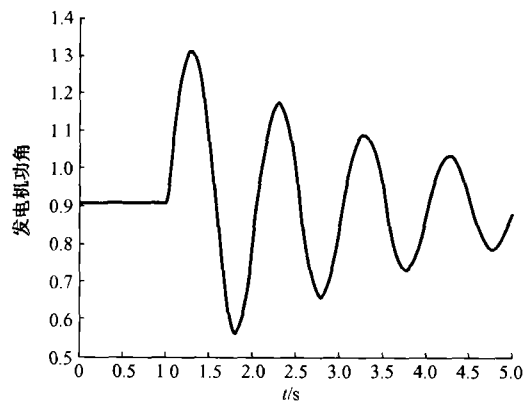


图3 故障持续时间 50 ms 发电机电角曲线
Fig. 3 Rotor angle curve with 50 ms fault period

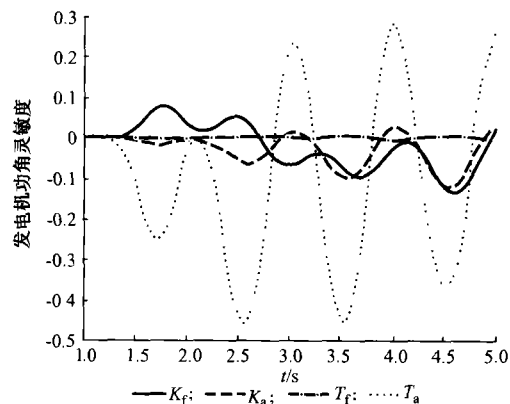


图4 故障持续时间 50 ms 发电机电角对励磁系统参数的灵敏度曲线
Fig. 4 Sensitivity curve with respect to excitation system parameters for 50 ms fault period

从图中可以看出,在这个动态过程中,励磁系统参数 K_f , K_a , T_f 与 T_a 对发电机电角动态影响都很小,也就是说,改变这 4 个参数的值,不会对系统功

角振荡产生本质的影响。相比而言,功角动态受励磁系统参数 T_i 影响很小,而受时间常数 T_a 影响较大。值得注意的是,随着动态过程的演化, T_a 对系统动态的影响加大了。

增加故障持续时间至 100 ms,图 5 所示为发电机相应的功角曲线,图 6 所示为发电机功角对励磁系统参数的灵敏度值。

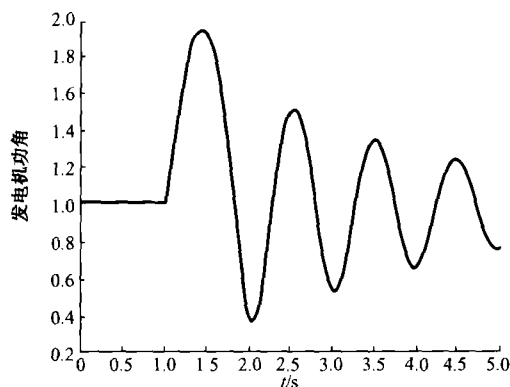


图 5 故障持续时间 100 ms 发电机功角曲线
Fig. 5 Rotor angle curve with 100 ms fault period

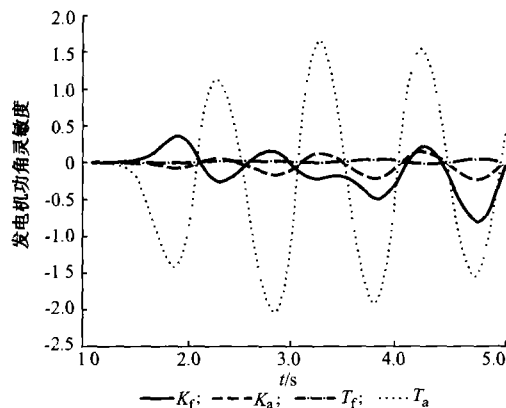


图 6 故障持续时间 100 ms 发电机功角对励磁系统参数的灵敏度曲线
Fig. 6 Sensitivity curve with respect to excitation system parameters for 100 ms fault period

从图 5 可以看出,由于故障持续时间加大,发电机受扰程度增加,其摆角明显增大。

对比图 6 与图 5 可以看出,在故障持续时间加大的情形下,灵敏度参数值较故障持续时间较短时大大增加,这说明励磁控制器参数对系统动态的影响,随着系统动态的加剧也明显增加。值得注意的是,在故障持续时间不同的两种情形下,系统动态对同一参数的灵敏度不但幅值不同,而且灵敏度的符号也有可能发生变化。换言之,参数对系统动态过程的影响程度、影响方式依赖于系统动态过程的不同而不同。这一点在随后的多机系统仿真中将进一步体现。

3 IEEE 10 机 39 母线系统动态变量对励磁系统参数的灵敏度分析

图 7 给出了 IEEE 10 机 39 母线系统的接线图^[16]。其中 39 号发电机采用了经典二阶模型(BPA 程序中 MC 模型),其余发电机采用了双轴模型(BPA 程序中 MF 模型),励磁器采用了 IEEE 连续、旋转直流励磁系统模型(BPA 程序中 EA 模型),结构框图已示于图 2 中。

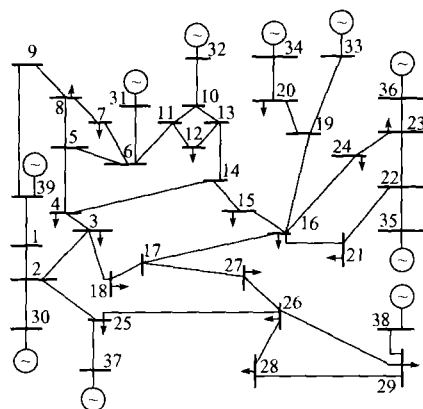


图 7 IEEE 10 机 39 母线接线
Fig. 7 IEEE 10-machine 39-bus system

假设 0 周期时,线路 3-18 在节点 3 线路开关后发生三相短路。5 周期后,故障切除,受扰系统发生振荡,但是没有发电机失稳。仿真表明,该故障的临界切除时间为 11.45 周期,接于 34 号母线上的发电机是临界失稳机组。为了分析参数灵敏度的影响,不妨定义某台发电机功角对自身控制器参数的灵敏度为自灵敏度;而将某台发电机对其他发电机控制器参数的灵敏度定义为互灵敏度。图 8 至图 11 分别显示了 5 周期切除故障时,发电机 30 功角动态对自身励磁系统参数的自灵敏度,发电机 34 的功角动态对发电机 30 励磁系统参数的互灵敏度,发电机 34 的功角动态对自身励磁系统参数的自灵敏度以及发电机 30 的功角动态对发电机 34 励磁系统参数的互灵敏度。

从图中可以看出,无论是 30 号机的功角动态还是 34 号机的功角动态,对励磁系统参数 K_f 和 T_a 的灵敏度都较大,而对励磁系统参数 K_a 和 T_i 的灵敏度都较小;换言之,无论是 30 号机还是 34 号机,其励磁系统参数 K_f 和 T_a 对整个系统动态有较大影响。

对比图 8 与图 9、图 10 与图 11 还可以看出,某一台机的励磁系统参数对多机系统中不同的发电机的影响不同。在动态过程的不同时间区间上,同一参数对动态过程的影响也不同。图 8~图 11 还显示,不同参数对系统动态过程影响开始起作用的时

间先后也不一样。

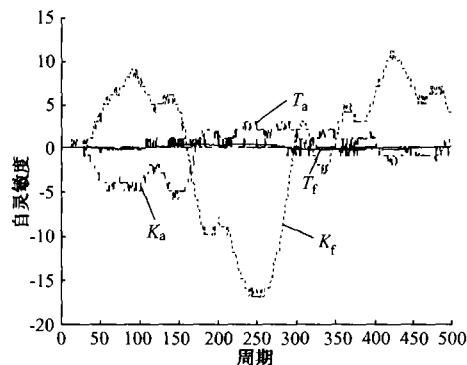


图8 故障持续时间5周期30号发电机功角对励磁系统参数的自灵敏度

Fig. 8 Self-sensitivity of G30 with respect to excitation system parameters for 5-cycle fault period

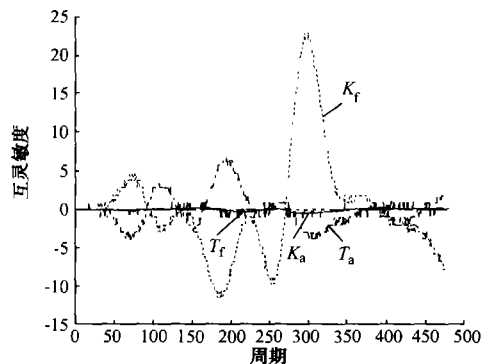


图9 故障持续时间5周期34号机功角对30号机励磁系统参数的互灵敏度

Fig. 9 Multi-sensitivity of G34 with respect to excitation system parameters of G30 for 5-cycle fault period

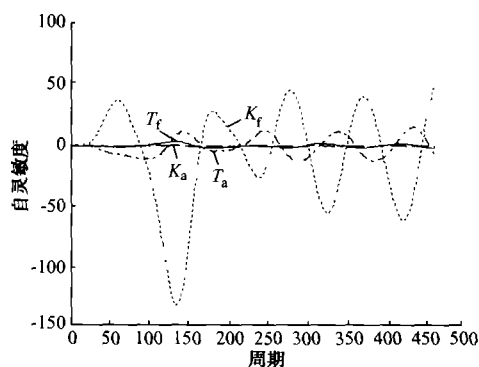


图10 故障持续时间5周期34号机功角对励磁系统参数的自灵敏度

Fig. 10 Self-sensitivity of G34 with respect to excitation system parameters for 5-cycle fault period

观察图8~图11,在动态过程中自灵敏度与互灵敏度有以下现象:

1) 同一个发电机的同一个参数(如30号机励磁系统的 K_f)对不同发电机的影响虽然大小不同,但影响动态过程的相对程度大致相同,如30号机的

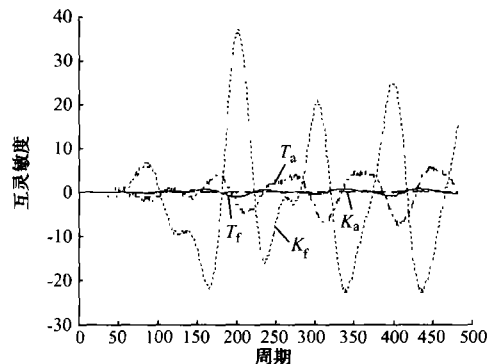


图11 故障持续时间5周期30号机功角对34号机励磁系统参数的互灵敏度

Fig. 11 Multi-sensitivity of G30 with respect to excitation system parameters of G34 for 5-cycle fault period

K_f 对30号机与34号机的功角影响都是最大的。30号机的 K_a 对30号机与34号机的功角都几乎没有影响。

2) 不同发电机的同一个参数(如30号机的 K_f 与34号机的 K_f)对系统动态过程的影响,首先是程度不同,如30号机的 K_f 对30号机自身与34号机功角的影响都远小于34号机 K_f 对34号机自身及30号机功角的影响程度;进一步分析表明,其对系统动态的影响在各自机组所有参数中所处的相对地位也不同。如在30号机的所有参数中,30号机的 T_a 与其他参数相比,对30号机、34号机的功角影响都很小;但是34号机的 T_a 与其他参数相比,对30号机、34号机的功角相对影响都较大。

3) 参数的自灵敏度与互灵敏度没有确切的大小关系,例如30号机功角受自身 K_f 的影响小于受34号机 K_f 的影响。因此,影响某台机动态过程的参数可能不是本机的控制参数,而极有可能是一个影响整个系统动态的参数。因此,灵敏度分析也许可以用于寻找系统动态特征;反过来,通过研究系统的动态特征,也许可以缩小计算灵敏度的参数空间,这部分的研究工作正在进行中。

对比图4、图6与图8~图11,可以看出单机与多机系统的动态过程对励磁控制系统的参数灵敏度的相对程度不同。在图4、图6中,励磁控制系统参数 T_a 对系统动态程度影响最大,而在图8~图11中,励磁控制系统参数 K_f 对系统动态程度影响最大,因此参数对系统动态过程的影响程度、影响方式依赖于系统动态过程的不同而不同。

图12~图15分别显示了11.45周期切除故障时,发电机30功角动态对自身励磁系统参数的自灵敏度,发电机34的功角动态对发电机30励磁系统参数的互灵敏度,发电机34的功角动态对自身励磁

系统参数的自灵敏度以及发电机 30 的功角动态对发电机 34 励磁系统参数的互灵敏度。

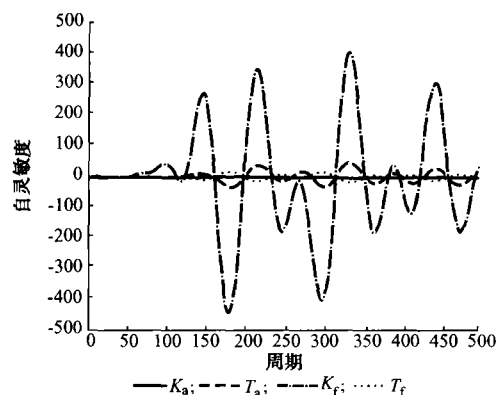


图 12 故障持续时间 11.45 周期 30 号发电机功角对励磁系统参数的自灵敏度

Fig. 12 Self-sensitivity of G30 with respect to excitation system parameters for 11.45-cycle fault period

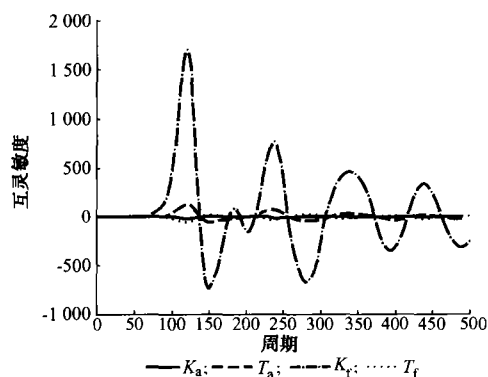


图 13 故障持续时间 11.45 周期 34 号机功角对 30 号机励磁系统参数的互灵敏度

Fig. 13 Multi-sensitivity of G34 with respect to excitation system parameters of G30 for 11.45-cycle fault period

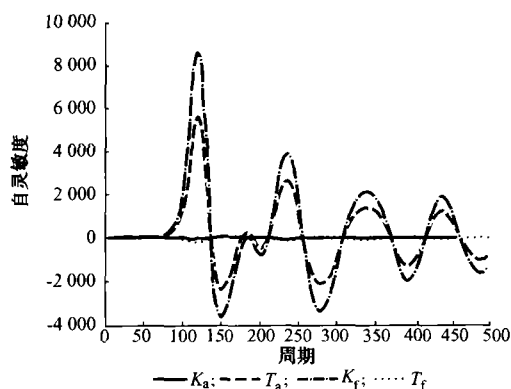


图 14 故障持续时间 11.45 周期 34 号机功角对励磁系统参数的自灵敏度

Fig. 14 Self-sensitivity of G34 with respect to excitation system parameters for 11.45-cycle fault period

对比图 12~图 15 与图 8~图 11,可以看出在临界切除时间下,系统动态对参数的灵敏度显著增大;这表明,在系统临界稳定状态下,控制器参数微

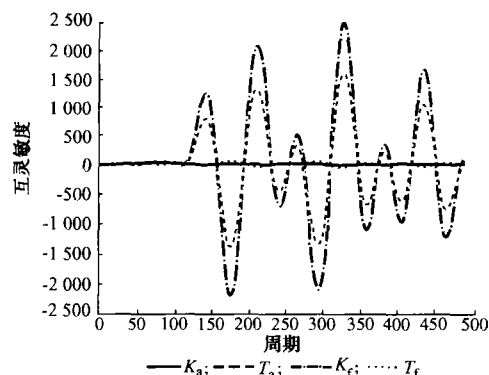


图 15 故障持续时间 11.45 周期 30 号机功角对 34 号机励磁系统参数的互灵敏度

Fig. 15 Multi-sensitivity of G30 with respect to excitation system parameters of G34 for 11.45-cycle fault period

小的变化会导致系统动态发生质的变化。研究不同发电机动态对控制器参数的自灵敏度与互灵敏度显示,临界失稳机组对控制器参数的自灵敏度与互灵敏度较其他机组的自灵敏度与互灵敏度明显占优,而临界失稳机组的控制器参数对其他机组的动态也有明显的影响。这从一个侧面反映了暂态稳定控制的关键是寻找临界失稳机组,对其施加的稳定控制对整个系统动态都有显著的影响。

图 12~图 15 还显示机组对控制参数的互灵敏度有可能大于机组对控制参数的自灵敏度,因此在动态仿真验证中,动态过程对参数的灵敏度分析不能本地化。

图 16 与图 17 分别给出了 5 周期与 11.45 周期切除故障,34 号机功角对 30 号机励磁系统参数 K_e 与 T_{a1} 的互灵敏度曲线。

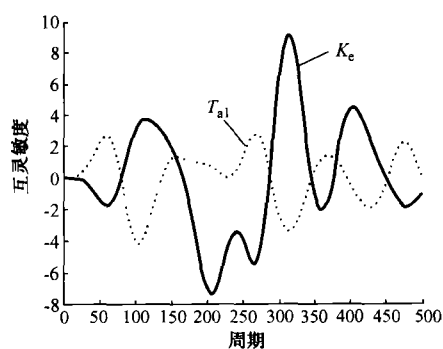


图 16 故障持续时间 5 周期 34 号机功角对 30 号机励磁系统参数 (K_e, T_{a1}) 的互灵敏度

Fig. 16 Multi-sensitivity of G34 with respect to excitation system parameters (K_e, T_{a1}) of G30 for 5-cycle fault period

从图中可以看出,在故障持续时间为 5 个周期的情形下,30 号机励磁控制器参数 K_e 与 T_{a1} 对 34 号机功角动态影响程度是相近的;然而当故障持

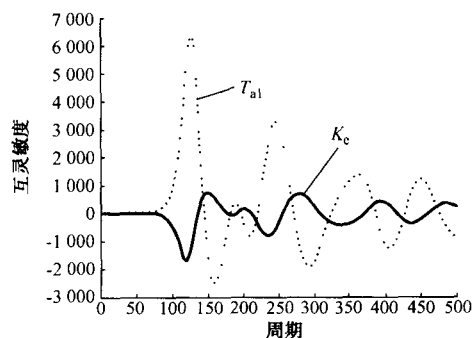


图 17 故障持续时间 11.45 周期 34 号机功角对 30 号机励磁系统参数 (K_c, T_{a1}) 的互灵敏度

Fig. 17 Multi-sensitivity of G34 with respect to excitation system parameters (K_c, T_{a1}) of G30 for 11.45-cycle fault period

续时间增加至 11.45 个周期时, 30 号机励磁控制器参数 T_{a1} 对 34 号机功角动态影响程度远远超过了其励磁控制器参数 K_c 对系统动态的影响, 因此, 电力系统处于不同的运行状态时对系统影响大的参数是不同的。

4 结语

动态仿真验证的核心在于校核模型及参数的有效性, 不同参数的准确度对系统动态过程的影响程度不同。本文提出了一种分析电力系统动态灵敏度的方法, 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方程, 解决了参数奇异点处的灵敏度计算问题。本文进一步以单机对无穷大系统与 IEEE 10 机 39 节点系统为例, 计算了 IEEE-EA 型励磁系统参数对系统动态过程的影响, 分析了控制器参数对系统动态过程的影响特征。电力系统非线性强、参数多、维数高, 因此电力系统动态仿真的验证问题具有相当难度。进一步工作正在围绕如何有效确认影响系统动态过程的关键参数而展开。

参考文献

- [1] KOSTEREV D N, TAYLOR C W, MITTELSTADT W A. Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 967—979.
- [2] 李颖, 贺仁睦. 负荷与 PSS 的相互作用对系统动态稳定的影响. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 40—44.
LI Yin, HE Ren-mu. Effects of the Interaction Between Load and PSS on Power System Dynamic Stability. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 40—44.
- [3] 贺仁睦. 电力系统稳定问题研究的方法论. 电力系统自动化, 1998, 22(9): 9—1.
HE Ren-mu. Methodology Of Power System Stability Study. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(9): 9—1.
- [4] 贺仁睦. 电网动态实时监控及管理系统的构想. 电力系统自动化, 2002, 26(5): 1—4.
HE Ren-mu. Power System Dynamics Monitoring and Management System. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(5): 1—4.
- [5] 贺仁睦. 电力系统动态仿真准确度的探究. 电网技术, 2000, 24(12): 1—4.
HE Ren-mu. Research into Veracity of Power System Dynamic Simulation. Power System Technology, 2000, 24(12): 1—4.
- [6] 孙元章, 杨新林. 电力系统动态灵敏度的伴随方程方法. 电力系统自动化, 2003, 27(3): 6—12.
SUN Yuan-zhang, YANG Xin-lin. Adjoint Equation Methods for Dynamic Sensitivity Calculation in Power Systems. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(3): 6—12.
- [7] 常乃超, 郭志忠. EEAC 解析灵敏度分析的研究. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 38—40.
CHANG Nai-chao, GUO Zhi-zhong. Research on Analytical Sensitivity Analysis of Extended Equal-area Criterion. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 38—40.
- [8] LAUFENBERG M J, PAI M A. A New Approach to Dynamic Security Assessment Using Trajectory Sensitivities. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 953—958.
- [9] HISKENS I A, PAI M A. Trajectory Sensitivity Analysis of Hybrid Systems. IEEE Trans on Circuits and Systems I, 2000, 47(2): 204—220.
- [10] HISKENS I A, PAI M A. Sensitivity Analysis of Power System Trajectories: Recent Results. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Vol 3. Monterey (CA, USA): 1998. 439—443.
- [11] HISKENS I A, PAI M A. Power System Applications of Trajectory Sensitivities. In: Proceeding of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol 1. New York (NY, USA): 2002. 1200—1205.
- [12] NGUYEN T B, PAI M A, HISKENS I A. Direct Computation of Critical Clearing Time Using Trajectory Sensitivities. In: Proceeding of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol 1. Seattle (WA, USA): 2000. 604—608.
- [13] 周鲲鹏, 陈允平. 运用轨迹灵敏度的电力系统动态安全控制. 电网技术, 2003, 27(12): 46—50.
ZHOU Kun-peng, CHEN Yun-ping. Power System Dynamic Security Control Based on Trajectory Sensitivity. Power System Technology, 2003, 27(12): 46—50.
- [14] KUNDUR P. Power System Stability and Control. New York (NY, USA): McGraw-Hill Inc, 1993.
- [15] 中国电科院. 中国版 BPA 暂态稳定程序用户手册. 2000.
Chinese Academy of Science. Electric Power Research Institute of China BPA Transient Stability Program User's Manual. 2000.
- [16] 傅书遵, 倪以信, 薛禹胜. 直接法稳定分析. 北京: 中国电力出版社, 1999.
FU Shu-di, NI Yi-xin, XUE Yu-sheng. Direct Method for Analyzing Transient Stability. Beijing: China Electric Power Press, 1999.

马 进(1975—),男,博士,讲师,研究方向为电力系统非线性分析与控制,电力系统动态仿真。E-mail: majin@tsinghua.org.cn

王景钢(1980—),男,硕士,研究方向为电力系统动态仿真分析。

贺仁睦(1944—),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为负荷模型、电力系统动态仿真分析与控制。

Sensitivity Analysis of Power System Dynamic Simulation

MA Jin, WANG Jing-gang, HE Ren-mu

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control of Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Dynamic simulation is not only the basic tool for the analysis and control of power system dynamic security, but also the key reference for system operation in a power dispatching center. The accuracy of the dynamic simulation thus greatly influences the economical operation as well as the security of power system. It's important to find the parameters, especially those of controllers, which affect the accuracy of the simulation most. This paper presents a novel view on calculating the sensitivity of the system dynamics with respect to the system parameters by converting the dynamic equation into an algebraic polynomial, then equalizing the coefficients of the disturbance of the parameters. The method proposed can be used to calculate the sensitivity at singular points, where analytic derivatives do not exist. Taking OMIB system and IEEE 10-machine 39-bus system as examples, this paper further calculates the sensitivity of the system dynamics with respect to the parameters of an IEEE-EA type excitation system. The characteristics of such sensitivity are analyzed in detail.

This work is supported by the Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217901) and North China Electric Power University Fund (No. Dr2004-11).

Key words: power systems; dynamic simulation; sensitivity analysis

(上接第 7 页 continued from page 7)

文福拴(1965—),男,博士,主要从事电力市场及电力系统故障诊断方面的研究工作。E-mail: fswen@eee.hku.hk

刘建新(1962—),男,教授,主要从事电工理论与新技术及电力市场方面的研究工作。E-mail: dicncepu@heinfo.net

An Investigation on the Mechanism of Tacit Collusions Among Generation Companies in Electricity Markets

MA Xin-shun¹, WEN Fu-shuan², LIU Jian-xin¹

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

(2. The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: The infinitely repeated auctions in electricity markets facilitate the forming of tacit collusions among generation companies which certainly have negative effects on the normal and efficient operation of electricity markets. In the framework of infinitely repeated non-cooperative game theory under complete information, an effort is made for examining the mechanism of tacit collusions among generation companies. A single-period static gaming model is first developed for two symmetrical generation companies in an electricity market with the market clearing price (MCP) employed for settlement, and the existence of a Nash equilibrium state is proved. On this basis, the mechanism of the tacit collusion among two generation companies in infinitely repeated auctions is next investigated with cyclical demand fluctuations taken into consideration, and a sufficient as well as necessary condition is obtained concerning the sustainability of a tacit collusion equilibrium state. The relationships between the sustainability of the tacit collusion and generation installed capacities of generation companies as well as the cyclical load fluctuations are analyzed through both theoretical and numerical studies, and the impacts of linear and quadratic production cost functions on the tacit collusion equilibrium state are examined.

This work is jointly supported by the Research Grant Committee (RGC) of Hong Kong Government (No. 7173/03E) and a seed funding project from the University of Hong Kong (No. 10205245/38689/14300/301/01).

Key words: electricity market; noncooperative game; tacit collusion; cyclical demand fluctuation