

PMU 所获轨迹的稳定裕度

徐 伟^{1,2}, 薛禹胜^{2,1}, 张明亮³, 孙素琴³, Zhaoyang DONG⁴

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏省南京市 210096; 2. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003;
3. 河南省电力公司, 河南省郑州市 450052; 4. 香港理工大学, 香港)

摘要: 稳定裕度的评估包括获得受扰轨迹和分析轨迹能量这 2 个任务。虽然相量测量单元 (PMU) 采集的受扰轨迹避开了仿真模型、参数及扰动中包含的不真实性, 但只有在计算该轨迹的稳定裕度时也不用系统模型, 才能精确量化实际受扰系统的稳定性。在无系统模型的情况下, 基于扩展等面积准则 (EEAC) 可以精确地量化失稳轨迹的稳定性, 但要量化稳定轨迹的稳定性却遇到极大困难。由于高维时变系统的在线识别更为困难, 故采用功率-功角曲线的外推来虚构摆动最远点 (FEP) 后的轨迹和潜在势能, 并提出通过时变性指标来识别那些外推误差大的算例。通过对 IEEE 39 系统和华东电网的仿真, 验证了所建议的无模型评估方法。

关键词: 稳定裕度; 相量测量单元; 知识挖掘; 曲线外推; 时变性; 可接受度

中图分类号: TM712

0 引言

现代电力系统在增加输电能力和运行灵活性的同时, 也增加了系统的复杂性和相继开断的风险。因此, 必须采集和处理广域的静态和动态信息, 定量评估系统稳定性, 并自适应地优化决策^[1]。

数字仿真或物理模拟可以通过改变模型、参数和场景来了解这些因素对系统动态的影响。但由于难以掌握系统真实的模型和参数, 因此, 仿真轨迹难以精确反映实际系统的动态行为^[2]。相量测量单元 (PMU) 采集到的实测轨迹 (以下简称为 PMU 轨迹) 则不依赖对系统模型和参数的先验知识, 但若要求真实反映实际系统的稳定程度, 则在分析轨迹能量时也不能依赖假设的数学模型。

扩展等面积准则 (EEAC) 不需要系统的模型即可计算失稳轨迹的稳定裕度, 但需要系统在摆动最远点 (FEP) 处收缩到发电机内节点的导纳阵 ($\mathbf{Y}_{\text{red}}$) 才能计算稳定轨迹的稳定裕度。因此, 若要评估 PMU 轨迹的稳定裕度, 则要么先识别出 $\mathbf{Y}_{\text{red}}$, 要么不依赖数学模型而定义轨迹的稳定裕度。而若要进一步支持控制决策, 则必须掌握精度被认可的数学模型, 否则控制效果就不可能得到事前的确认^[3]。

数学模型包括结构和参数这 2 个方面。参数识别是在给定模型结构下, 使用最小二乘法来识别模

型的参数。文献[4]采用最小二乘法拟合 $\mathbf{Y}_{\text{red}}$, 并用来评估实测轨迹的稳定裕度。电力系统多参数及时变性, 对参数识别的数据窗口提出相反要求, 难以满足。

因此, 不依赖数学模型而直接评估受扰轨迹的稳定裕度就显得格外重要。文献[5]根据 EEAC 理论聚合受扰轨迹, 再按正弦曲线的外推来构造 FEP 后的功率-功角 ($P-\delta$) 曲线并量化首摆稳定性。由于强时变系统的外推并不总是可靠, 故必须辅以时变性校核, 只有那些通过了校核的结果才能被接受。

本文提出曲线外推技术来估算从 FEP 到动态鞍点 (DSP) 之间的虚构轨迹, 以避免按实测曲线识别 $\mathbf{Y}_{\text{red}}$ 的困难。为了考核该无模型轨迹裕度评估方法的精度, 在数字仿真得到受扰轨迹后, 分别通过曲线外推和 $\mathbf{Y}_{\text{red}}$ 这 2 种方法计算稳定裕度, 并用其差值反映该方法的误差。在 IEEE 39 和华东系统的模型上验证了该方法。

1 背景技术及难点分析

1.1 EEAC 理论

EEAC 理论是基于轨迹的暂态稳定量化分析方法, 它有机地结合了数值积分法与经典控制理论, 已被国内外电力工程界广泛用来分析稳定域和优化控制决策^[6]。该理论通过互补群惯量中心相对运动 (CCCOI-RM) 变换将多机轨迹映射到一系列单机无穷大 (OMIB) 系统的平面上, 形成时变 OMIB 系统的 $P-\delta$ 曲线。该轨迹降维过程严格地保持了原轨迹的全部动态信息, 多机系统稳定的充要条件严格等

收稿日期: 2009-02-13。

国家自然科学基金重大项目 (50595413); 国家电网公司科技项目 (SGKJ[2007]98&187&2009)。

于各映象系统稳定充要条件中最苛刻者。上述结论与该轨迹来自仿真还是实测无关。

如果 OMIB 映象的动能在某次摆动过程中减小到 0, 则称该点为 FEP, 并确认该次摆动稳定; 如果在正向摆动中的减速力减小到 0, 或在反向摆动中的减速力增加到 0, 则称该点为 DSP, 并确认该次摆动不稳定。

只要是失稳轨迹, 就一定能在其上找到 DSP。由于 EEAC 理论反映了稳定的充要条件, 故不会将任何失稳的实测轨迹误判为稳定。DSP 处的动能 $E_{K, DSP}$ 用 $P-\delta$ 曲线围成的动能增加面积标么化后, 取其负值作为该失稳轨迹的稳定裕度。失稳轨迹的稳定裕度可由 PMU 轨迹精确计算, 而不需要系统的数学模型。理论上能保证与仿真轨迹的量化精度相当。

只要是稳定的轨迹摆次, 就一定能在其上找到 FEP。同样不会将任何稳定的实测轨迹误判为失稳。映象系统在 FEP 处的潜在势能就是该摆次的稳定裕度, 反映了该映象系统还能吸收的动能。若在 FEP 点冻结原多机系统的非自治因素以及互补群内的非同调因素, 映象系统就成为定常的 OMIB 系统, 对应的 $P-\delta$ 虚构曲线退化为正弦函数。

对于仿真轨迹, 如果原多机系统的模型已知, 则可根据 $\mathbf{Y}_{red}$, 求取上述虚构正弦曲线及其所围成的动能减少面积 $A_{dec, pot}$ 的解析式。该值经标么化后就是稳定轨迹的裕度解析式。

对于无模型的系统实测轨迹, 若在计算稳定轨迹裕度时采用假想的系统模型, 不但失去实测轨迹与系统模型无关的优点, 还会引入更大的偏差。有 2 个解决路径: ① 先行识别系统的模型及参数。多参数识别要求非常宽的数据窗口, 而时变性却要求数据窗口非常窄, 两者难以协调。② 不依赖系统模型而直接虚构 FEP 后的轨迹, 这似乎成为唯一的工程选择。

1.2 正弦外推技术

将虚构轨迹的电磁功率表示为含有 3 个待识别参数 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ 的正弦函数:

$$P_{e, k} = P_{c, k} + P_{\max, k} \sin(\delta - v_k) = \lambda_{0, k} + \lambda_{1, k} \cos \delta + \lambda_{2, k} \sin \delta \quad (1)$$

式中: 下标 k 代表第 k 个时间窗口; $P_{c, k} = \lambda_{0, k}$;

$$P_{\max, k} = (\lambda_{1, k}^2 + \lambda_{2, k}^2)^{\frac{1}{2}}; v(k) = -\arctan \frac{\lambda_{1, k}}{\lambda_{2, k}}.$$

根据到达 FEP 之前的 3 个或更多个时刻的数据 (δ, P_e) , 用最小二乘法得到 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$, 并根据正弦曲线的外推虚构 FEP 后的轨迹^[5]。实际仿真中发现 $P_e-\delta$ 曲线在 FEP 附近的斜率很大, 特别是对于

具有强时变特性的映象在按正弦曲线外推时表现出很强的数值病态。此时, 按照 FEP 附近的数据外推, 可能无法得到有意义的正弦参数。若虚构曲线上不存在虚构的 DSP, 则正弦外推方法不再适用。

既然不能保证稳定轨迹裕度的定量分析误差总是很小, 就只能通过评估 FEP 前面一段轨迹的时变性, 来识别那些正弦曲线外推误差大的算例。这意味着要找到强时变系统的轨迹特征。虽然这也不是件容易的事, 但与确保算法误差不大的任务相比, 还是容易得多。

1.3 时变性指标的研究现状

OMIB 映象的时变性不但可由系统本身的时变因素引起, 并且在对非理想两群模式的轨迹进行保稳降维时, 会将群内非同调性转化为映象系统的时变性。文献[6]将静态 EEAC(SEEAC)预报结果与严格的逐点映射之间的差值定义为“时变因素校正量”, 用来分析群内轨迹的非同调性如何影响映象的稳定裕度, 并可区分不同时段内的影响程度。但该指标需要系统模型的支持, 故不能用于实测轨迹的分析。另外一类指标则是评估整个受扰过程中时变性的强弱, 用来指导数值积分的自动终止, 并不适合于评估某个短时段内的时变性强弱。例如: 文献[7]取临界群(或余下群)内各机相对于该群惯量中心的总动能为该群的非同调指标, 该指标不需要系统模型, 但是不能反映模型因素的影响。文献[8]选取相邻摆次动能变化量的最大值、动能的平均变化率, 以及映象系统的功角曲线与理想哈密顿系统功角曲线所围面积作为定量指标来预判稳定轨迹的后续稳定性。这 2 类指标都难以直接校核正弦外推的误差。

2 曲线外推技术在强时变因素下病态机理

定常多机系统的受扰轨迹若是理想的两群动态, 则主导映象上的 $P_e^{\text{IE}}-\delta$ 曲线一定为理想的正弦曲线。此时, 按到达 FEP 之前该摆的任意一段轨迹的数据 $(\delta, P_e^{\text{IE}})$ 外推, 其效果都与按照 $\mathbf{Y}_{red}$ 计算的结果相同。这也是推荐采用正弦函数而不是二次函数的原因。

在 FEP 附近产生病态的原因是时变因素, 包括原多机系统模型中的时变因素、代数方程对微分方程的影响, 以及非理想两群动态经过保稳降维变换而转换成的时变因素。若时变性不强, 按正弦曲线外推 $P-\delta$ 曲线的效果很好; 否则, 其精度就差。

文献[6]通过评估群内非同调程度来反映映象系统时变因素的强弱, 当群内相对运动的动能相对于群际运动不可忽略时, 映象 OMIB 系统的时变性也就显现。任何稳定摆次的映象轨迹在趋近 FEP

时,映象速度和动能越来越小,并在 FEP 处降为 0。期间,群内不同调所对应的群内动能则可能比群际动能大得多,故 FEP 附近容易表现出强时变性^[9]。

映象 $P_e^{\text{IE}}-\delta$ 曲线的斜率可表示为该积分时步中的 $\Delta P_e^{\text{IE}}/\Delta\delta$ 。其中,FEP 附近的映象速度很小,故 $\Delta\delta$ 也很小。另一方面,

$$\Delta P_e^{\text{IE}} = \Delta P_e^{\text{SE}} + \Delta P_e^{\text{TC}} \quad (2)$$

若将映象实际电功率 P_e^{IE} 的时变正弦参数 $P_c(t), P_{\max}(t), v(t)$ 固定在某个积分时间步的起始时刻,则 $P_e^{\text{SE}}(\delta)$ 在该积分时间步内可表示为:

$$P_e^{\text{SE}}(\delta) = P_c + P_{\max} \sin(\delta - v) \quad (3)$$

可知:

$$\Delta P_e^{\text{SE}} = \Delta\delta P_{\max} \cos(\delta_0 - v) \quad (4)$$

为有限值,并随着趋于 FEP 而趋于 0。

群内非同调性产生的时变因素校正量 ΔP_e^{TC} 为^[6]:

$$\Delta P_e^{\text{TC}} = \frac{M_a(\Delta P_{e,ss} + \Delta P_{e,sa}) - M_s(\Delta P_{e,aa} + \Delta P_{e,as})}{M_t} \quad (5)$$

式中:

$$\Delta P_{e,ss} = \sum_{i,k \in S, k \neq i} E_i E_k G_{ik} (\cos \xi_{ik} - \cos \xi_{ik0}) \quad (6)$$

$$\Delta P_{e,sa} = \sum_{i \in S, j \in A} \sqrt{G_{ij}^2 + B_{ij}^2} (\cos \xi_{ij} - \cos \xi_{ij0}) \cos(\delta_0 - \theta_{sa}) \quad (7)$$

$$\Delta P_{e,aa} = \sum_{j,l \in A, l \neq j} E_j E_l G_{jl} (\cos \xi_{jl} - \cos \xi_{jl0}) \quad (8)$$

$$\Delta P_{e,as} = \sum_{i \in S, j \in A} \sqrt{G_{ij}^2 + B_{ij}^2} (\cos \xi_{ij} - \cos \xi_{ij0}) \cos(\delta_0 + \theta_{sa}) \quad (9)$$

下标 s, a 分别表示领前群和余下群。

在 FEP 附近, $\cos \xi_{ik} - \cos \xi_{ik0} (\forall i, k \in S, k \neq i)$ 及 $\cos \xi_{jl} - \cos \xi_{jl0} (\forall j, l \in A, j \neq l)$ 的值都可能很大,故 ΔP_e^{TC} 的值可能相当大。而有 $\Delta P_e^{\text{IE}} \approx \Delta P_e^{\text{TC}}$ 。

用它去除很小且伴有量测噪声的 $\Delta\delta$,得到的 $P_e^{\text{IE}}-\delta$ 曲线斜率 $\Delta P_e^{\text{IE}}/\Delta\delta$ 可能非常大,且数值不稳定。这将使曲线外推公式表现出很强的数值病态。

3 正弦外推数据窗口的选择

正弦外推技术需要根据数据窗口内的曲线来计算正弦参数。过窄的数据窗口可能受量测噪声的影响太大,而过宽的数据窗口则不能正确反映时变因素。因此,应在满足抗噪要求的前提下,取用尽量短的窗口。

在稳定的轨迹中,需要特别关注的是那些较接近临界的算例。因此,当 P_e 的绝对值在 FEP 之前

一直单调增加时,可以断定该摆次的稳定裕度足够大,而无需精确估算其稳定裕度,或无需校核其病态问题。否则,就应该判断 $P_e^{\text{IE}}-\delta$ 曲线在 FEP 附近的病态,并将数据窗口避开病态区段。

从 FEP 开始,沿着 $P_e^{\text{IE}}-\delta$ 曲线反向搜索,当相邻的 2 个积分时间步上的 $\Delta P_e^{\text{IE}}/\Delta\delta$ 不再明显减小时,表示 $P_e^{\text{IE}}-\delta$ 曲线的外推受病态的影响不再严重。记该点为离 FEP 最近的可用数据点 (applicable point, AP),而计算外推的正弦参数的数据窗口必须避开 AP 至 FEP 的区间。当忽略噪声时,可取 AP 之前的 3 个数据点来计算正弦外推参数。

若 AP 比 $P_e^{\text{IE}}-\delta$ 曲线的极值点 (extreme point, EP) 还要远离 FEP,因此 AP 处的曲线斜率的符号已与 FEP 处不同,则不应该使用正弦外推。

4 基于正弦外推的时变性指标

定常多机系统的理想两群动态的映象 $P_e^{\text{IE}}-\delta$ 曲线符合正弦规律,因此,用正弦函数拟合任意窗口内的数据将得到相同结果。在没有数学模型支持时,可用实测轨迹与正弦函数的差异来反映时变性的强弱。

分别取动态中心点 (DCP) 或故障清除点, EP, AP 附近的 3 个窗口。为了拟合正弦参数,每个窗口内至少要有 3 个数据点。使用外推曲线所围的虚构面积作为比较对象,分别记为 $\Gamma_{\text{DCP}}, \Gamma_{\text{EP}}, \Gamma_{\text{AP}}$ 。若其中有一个因为正弦外推曲线不存在虚构 DSP 而无法计算,则直接判为时变性过强。否则,将一阶时变性指标定义为:

$$I_a^{(1)} = \frac{\Gamma_{\text{EP}} - \Gamma_{\text{DCP}}}{\delta_{\text{EP}} - \delta_{\text{DCP}}} \quad (10)$$

$$I_\beta^{(1)} = \frac{\Gamma_{\text{AP}} - \Gamma_{\text{EP}}}{\delta_{\text{AP}} - \delta_{\text{EP}}} \quad (11)$$

二阶时变性指标定义为:

$$I^{(2)} = \frac{I_a^{(1)} - I_\beta^{(1)}}{\delta_{\text{AP}} - \delta_{\text{EP}}} \quad (12)$$

为比较不同算例,可按 Γ_{EP} 进行标么化。只有当 $I_a^{(1)}, I_\beta^{(1)}, I^{(2)}$ 都足够小时,外推结果才被认可。

5 直线外推技术及其时变性校核

若算例具有以下任一特征:①正弦外推的虚构轨迹上没有 DSP;② $P_e^{\text{IE}}-\delta$ 曲线在 FEP 附近的病态使正弦外推技术无法找到合适的窗口;③无法通过时变性校核,则使用连接 EP 和 FEP 的直线来虚构 FEP 以后的轨迹,以保证得到虚构的 DSP,并给出偏保守的稳定裕度值。后者是以 FEP 与 DSP 连线为斜边的三角形的面积:

$$\eta = -\frac{1}{2} \frac{\delta_{EP} - \delta_{FEP}}{P_{e,EP} - P_{e,FEP}} |P_{e,FEP} - P_{m,FEP}|^2 \quad (13)$$

式中: $(\delta_{EP}, P_{e,EP})$ 和 $(\delta_{FEP}, P_{e,FEP})$ 分别为 EP 和 FEP 的坐标值; $P_{m,FEP}$ 为映象在 FEP 处的机械功率。

若 OMIB 映象的时变性非常强, 则按照 Y_{red} 计算的 P_e - δ 曲线在 FEP 处的斜率可能成为正值, 此时上述直线外推得到的稳定裕度会过于保守; 若 EP 到 FEP 之间距离过短, 受极值点处斜率为 0 的影响, 此时图 1 所示直线外推得到的稳定裕度会过于冒进。故需要下述时变性校核:

1) δ_{FEP} 的可信范围校核。由式(4) 知 δ_{FEP} 足够大 (例如大于 100°), 则按 Y_{red} 虚构的 P_e - δ 曲线在 FEP 处的斜率不会为正, 直线外推可以接受; 反之 (例如小于 80°), 则误差较大。此外, 若 $\delta_{FEP} - \delta_{EP}$ 太小, 则裕度估计冒进的可能较大。

2) 基于正弦外推的时变性指标值不能太大。

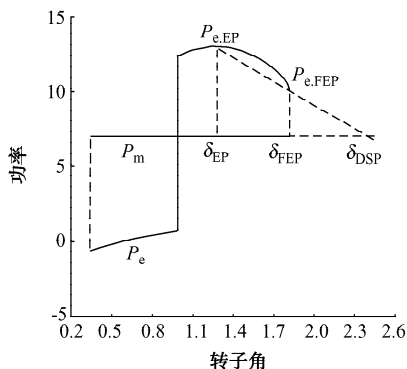


图 1 直线外推
Fig. 1 Linear extrapolation

6 算法流程

按照实测轨迹选择候选分群方式, 通过 CCCOI-RM 变换将实测的多机轨迹分别映射到各 OMIB 系统的平面上, 形成时变 OMIB 系统的 P - δ 曲线, 量化其稳定裕度, 识别出轨迹的主导模式^[10]。根据映象的 P - δ 曲线是否存在 DSP, 可定性判断系统的稳定性。

如果存在 DSP, 则可以直接计算失稳轨迹的稳定裕度。而对于稳定轨迹, 根据到达 FEP 之前的轨迹形状筛选出稳定裕度偏小的算例。针对这些算例, 通过曲线外推技术构造 FEP 后的虚构轨迹, 计算稳定裕度, 并从实测轨迹上提取时变性指标, 以识别稳定裕度误差大的算例。其中, 稳定裕度的误差定义为按曲线外推法和按数学模型计算的稳定裕度之差。具体算法流程见图 2。

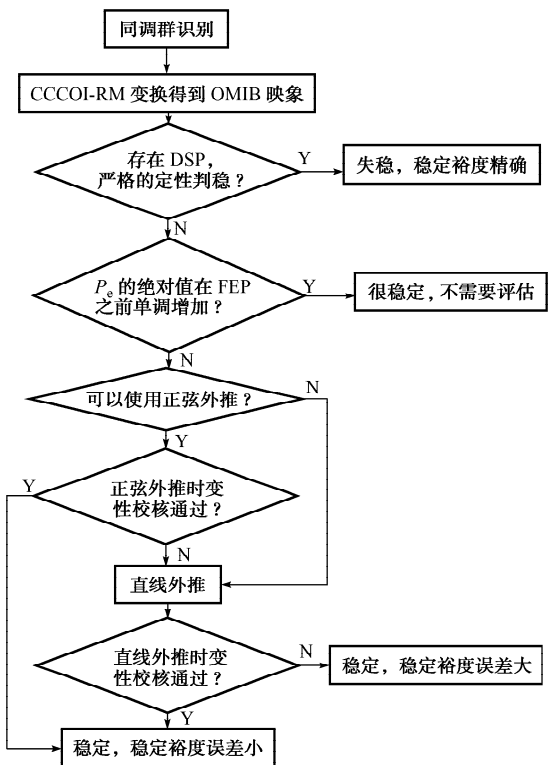


图 2 算法流程
Fig. 2 Flow chart of the algorithm

7 仿真校核

7.1 试验环境的设计

对给定的数学模型及场景进行动态仿真, 并在模型支持下计算时间响应曲线的稳定裕度, 作为比较的标准。然后, 在没有模型支持条件下, 用建议的上述算法分析同样的轨迹, 作为比较的对象, 考核算法的精度。改变模型或场景后, 反复上述过程以考核算法的强壮性。

7.2 仿真算例

取 IEEE 39 系统和华东电网为仿真对象, 故障类型为线路三相短路故障, 故障后切除线路。用基于 EEAC 的商业化软件 FASTEST 提供完整的摇摆曲线和轨迹的实际稳定裕度^[11]。选取 70 个稳定的且稳定裕度偏小的算例。其中, 17 个算例无法采用正弦外推。而在可以用正弦外推的 53 个算例中, 又有 17 个未能通过 7.3 节的时变性校核。这样, 就有 34 个算例必须采用直线外推, 其中有 10 个通过 7.4 节的时变性校核。

7.3 正弦外推时变性校核

使用正弦外推的算例的稳定裕度误差均小于 10, 即不存在过于冒进的算例。将稳定裕度误差的绝对值分为 $[0, 10]$, $(10, 20]$, $(20, 100]$ 这 3 个区间。以二阶时变性指标为横坐标, 一阶时变性指标为纵

坐标,按误差绝对值标在 3 张不同的图上(见图 3~图 5)。图 3 和图 4 标出了门槛值附近的算例误差。由图 5 可知,如果将一阶时变性指标的门槛值设为 3,二阶时变性指标的门槛值设为 20,则稳定裕度误差绝对值分布在 $(20,100]$ 之间的算例均得到可靠识别。

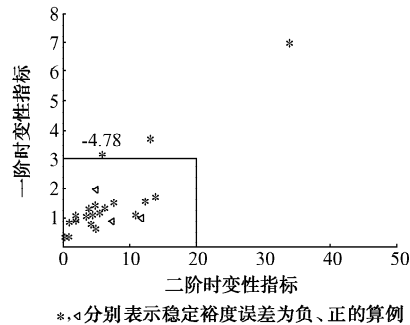


图 3 稳定裕度误差绝对值在 $[0,10]$ 之间
Fig. 3 Absolute value of stability margin error in $[0,10]$

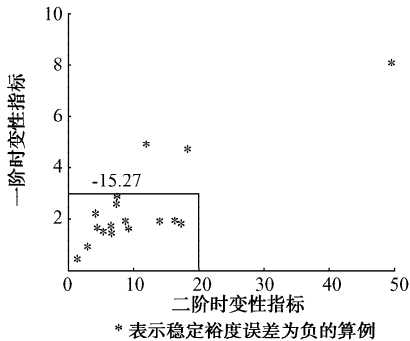


图 4 稳定裕度误差绝对值在 $(10,20]$ 之间
Fig. 4 Absolute value of stability margin error in $(10,20]$

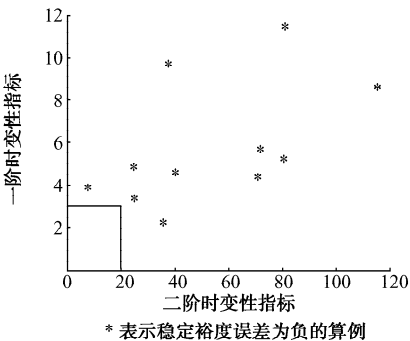


图 5 稳定裕度误差绝对值在 $(20,100]$ 之间
Fig. 5 Absolute value of stability margin error in $(20,100]$

表 1 给出了使用正弦外推的算例的统计结果。误差在 $[-100,-20]$ 内的算例均被可靠识别;误差越小的算例通过时变性校核的比例越大。

表 1 正弦外推时变性校核的统计结果
Table 1 Statistic results of time-variation test for sine extrapolation

稳定裕度误差/(%)	算例数	正确通过的小误差者	正确未通过的大误差者	不幸而未通过的	不幸而漏过的大误差者	正确通过校核的比例/(%)
$[-100,-20]$	11		11		0	100.00
$(-20,-10]$	17	14		3		82.35
$(-10,10]$	25	22		3		88.00
$(10,100]$	0		0		0	

7.4 直线外推时变性校核

对于无法通过正弦外推时变性校核的 17 个算例需要使用直线外推重新计算。加上必须使用直线外推计算的 17 个算例,共有 34 个算例需要进行直线外推的时变性校核。

$\delta_{FEP} < 80^\circ$ 的算例有 17 个,误差分布在 $[-100,-20]$ 之间的算例有 6 个,误差分布在 $(-20,10]$ 之间的算例有 5 个,误差分布在 $(10,100]$ 之间的算例有 6 个; $\delta_{FEP} > 100^\circ$ 的算例有 5 个,其误差均分布在 $(-20,10]$ 之间。

余下的算例中,无法计算时变性指标的算例有 5 个,这些算例的误差均分布在 $[-20,10]$ 之间;时变性指标可以计算的算例有 7 个,其稳定裕度误差与时变性指标之间的关系见图 6。如果将一阶时变性指标的门槛值设为 6,则稳定裕度误差分布在 $[-100,-20]$ 之间的算例均得到可靠识别。

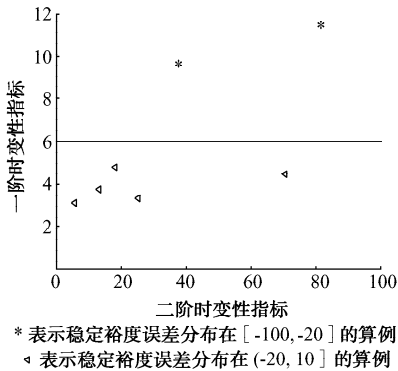


图 6 基于时变性指标的直线外推的时变性校核
Fig. 6 Time-variation test for linear extrapolation with time-variation index

表 2 给出了直线外推算例的统计结果。误差分布在 $[-100,-20]$ 和 $(10,100]$ 之间的算例均被可靠识别。

7.5 稳定裕度的可接受度

对于通过时变性校核的算例,还应考察其可接受度。将稳定裕度误差分布在 $[-20,-10]$ 之间的算例称为过分悲观的;分布在 $(-10,10]$ 之间的算例称为可接受的;分布在 $(10,20]$ 之间的算例称为过分乐观的。可接受度定义为可接受算例数目与通过时

变性校核的算例数目之比。表 3 给出实测轨迹稳定裕度值处在不同区间时的可接受度。结合实测的稳定裕度值和可接受度指标值,运行人员可以掌握系统的实际运行情况。

表 2 直线外推时变性校核的统计结果
Table 2 Statistic results of time-variation test for linear extrapolation

稳定裕度误差/(%)	算例数	正确通过的小误差者	正确通过的较大误差者	不幸而未通过的小误差者	不幸而未通过的大误差者	正确通过校核的比例/(%)
[-100,-20]	8		8		0	100.00
(-20,10]	20	10		10		50.00
(10,100]	6		6		0	100.00

表 3 通过时变性校核算例的可接受度
Table 3 Acceptability of cases passing time-variation test

实测的稳定裕度值/(%)	算例数 A	通过校核的算例数 B	不同稳定裕度误差分布之间的算例数 C	可接受 D	不可接受 E	可接受度 $\frac{D}{B}/(\%)$
[0,10]	9	7	2	5	0	71.43
(10,20]	15	11	6	5	0	45.45
(20,30]	15	14	5	9	0	64.29
(30,100]	31	14	5	9	0	64.29
总数	70	46	18	28	0	60.87

8 结语

本文提出的受扰轨迹稳定裕度的计算方法不需要掌握系统模型及参数。理论上可以保证所有(稳定或失稳)轨迹的定性判断正确;也可以保证所有失稳轨迹的定量分析结果与有系统模型下的仿真结果相比,只会有舍位误差。对于稳定的轨迹摆次,则只能通过大量仿真的统计结果来反映。在 IEEE 39 系统和华东电网的 70 个稳定的算例中,负的稳定裕度误差绝对值大于 20%的算例有 8 个,正的稳定裕度误差大于 10%的算例有 6 个,全部被正确识别。

总之,定性的判断全部正确,而且失稳轨迹定量分析的误差不会超出[-5%,5%]。由于这 2 个方面的强壮性都有机理上的保证,故完全能满足工程应用对可靠性的要求。

但是,对于稳定轨迹的定量分析,仿真中能通过时变性校核的算例,其评估误差分布在区间[-20%,10%]内。由于没有模型的支持,故无法完全摆脱启发性处理,在时变性更强的场合,稳定轨迹定量分析的精度上必然存在强壮性问题。这个遗留问题虽然不可能得到彻底解决,但在轨迹虚构技术及可信性指标的强壮性方面仍存在改进的空间。

参考文献

[1] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架:(一)从孤立防线到综合防

御. 电力系统自动化,2006,30(1):8-16.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts; Part I from isolated defense lines to coordinated defending. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.
[2] 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 Renmu. Power system dynamics monitoring and management system. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(5): 1-4.
[3] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架:(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制. 电力系统自动化,2006,30(2):1-10.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts; Part II reliable information, quantitative analyses and adaptive controls. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-10.
[4] 张鹏飞,薛禹胜,张启平,等. 基于 PMU 实测摇摆曲线的暂态稳定量化分析. 电力系统自动化,2004,28(20):17-20.
ZHANG Pengfei, XUE Yusheng, ZHANG Qiping, et al. Quantitative transient stability assessment method using phasor measurement. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20): 17-20.
[5] 滕林,刘万顺,袁志皓,等. 电力系统暂态稳定实时紧急控制的研究. 中国电机工程学报,2003,23(1):64-69.
TENG Lin, LIU Wanshun, YUN Zhihao, et al. Study of real-time power system transient stability emergency control. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 64-69.
[6] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论:非自治非线性多刚体系统的稳定性分析. 南京:江苏科技出版社,1999.
[7] 薛峰,丁纯,薛禹胜. 数值积分自动终止的算法及其工程应用. 电力系统自动化,2001,25(20):9-13.
XUE Feng, DING Chun, XUE Yusheng. Early termination algorithm for transient stability analysis. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(20): 9-13.
[8] 周海强,薛禹胜. 稳定轨迹后续稳定性的预估. 电力系统自动化,2002,26(3):1-5.
ZHOU Haiqiang, XUE Yusheng. New criterions for early termination of numerical simulations in transient stability analysis. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(3): 1-5.
[9] 殷明慧,邹云,薛禹胜. 病态 FEP 的识别及稳定裕度的修正. 电力系统自动化,2009,33(2):1-4.
YIN Minghui, ZOU Yun, XUE Yusheng. Identification of ill-conditioned FEP and correction of stability margin. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 1-4.
[10] 戴晨松,薛峰,薛禹胜. 受扰轨迹的分群研究. 电力系统自动化,2000,24(1):13-16.
DAI Chensong, XUE Feng, XUE Yusheng. Classification of disturbed trajectories. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 13-16.
[11] 薛禹胜. EEAC 和 FASTEST. 电力系统自动化,1998,22(9):25-30.
XUE Yusheng. EEAC and FASTEST. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(9): 25-30.

(下转第 18 页 continued on page 18)

徐 伟(1982—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力系统稳定分析与控制。E-mail: xuwei_seu@yahoo.com.cn

薛禹胜(1941—),男,中国工程院院士,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动化。E-mail: yxue@sgepri.com
张明亮(1971—),男,调度中心副主任,主要研究方向:电网调度运行管理。

Stability Margin Assessment of Disturbed Trajectories Acquired by PMU

XU Wei^{1,2}, XUE Yusheng^{2,1}, ZHANG Mingliang³, SUN Suqin³, Zhaoyang DONG⁴

- (1. Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;
3. Henan Electric Power Corporation, Zhengzhou 450052, China;
4. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract: The assessment of stability margin includes two tasks: the acquisition of disturbed trajectories and analysis of trajectory energy. Disturbed trajectories acquired by phasor measurement unit (PMU) can avoid the unfaithfulness of models, parameters and disturbance scenarios adopted for simulations. To quantify the stability of the disturbed system exactly, the calculation of the trajectory stability margin should not use supposed models. In a model-free situation, the stability of unstable trajectories can be quantified exactly based on extended equal-area criterion (EEAC) while the stability quantification of stable trajectories faces great difficulty. Online identification for a system of high dimensions and time-variation is even more difficult. Therefore, the extrapolation of power-angle curve is adopted to predict the imaginary trajectory after the farthest point (FEP) and potential energy. Time-variation indices are proposed to identify the cases with large error in extrapolation. The proposed method is validated on IEEE 39-bus system and East China power grid.

This work is jointly supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50595413) and State Grid Corporation of China (No. SGKJ[2007]98&187&2009).

Key words: stability margin; phasor measurement unit (PMU); knowledge mining; curve extrapolation; time-variation; acceptability