

基于相轨迹凹凸性的暂态不稳定性判别方法的分析比较

杨松浩,王怀远,苏福,张保会

(西安交通大学 电气工程学院 电力设备电气绝缘国家重点实验室,陕西 西安 710049)

摘要: 基于相轨迹凹凸性的暂态不稳定性判别与控制是近年来发展的新理论方法,有望应用于基于同步相量测量单元(PMU)信息的电力系统紧急控制。强调了该方法应用于多机系统时实时分群聚合的关键技术步骤以及正确使用相轨迹分段的必要性,分析了相关文献在应用该方法的过程中出现的问题,进一步对理解和应用该方法时的注意事项进行了详细深入的阐述。

关键词: 相轨迹; 凹凸性; 暂态不稳定性判别; 实时分群; 分段相轨迹; 暂态; 稳定性

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.09.027

0 引言

暂态稳定性分析与控制一直是电力系统研究的重要和困难问题之一,而大型电力系统的暂态稳定紧急控制更是亟待解决的重大问题。近年来广域测量系统 WAMS(Wide Area Measurement System)的建设和发展,为构建基于实测信息、不依赖电力系统模型和参数的暂态稳定性预测与实时控制奠定了物质基础,研究 WAMS 条件下的实时预测暂态失稳的理论与技术日益紧迫。

电力系统暂态稳定闭环控制的目的是保证大扰动后系统能保持稳定运行状态。对于系统可以自行稳定的扰动,闭环控制不会投入紧急控制措施;对于系统将会失去同步的扰动,闭环控制以最小的控制代价使系统进入新的稳定运行状态。因此暂态稳定闭环控制需要时刻监视暂态过程的发展,尽可能快地预测系统是否失步,进而实施正确的控制决策。阻止系统失稳的控制措施投入得越早,效果越好,代价也越小。

西安交通大学致力于实现基于响应的暂态稳定性的实时判别与控制,在基于相轨迹凹凸性的暂态不稳定性识别方法上进行了大量的研究工作^[1-20],并取得了一些阶段性的成果。其中基于相轨迹凹凸性的暂态稳定性闭环控制方法^[1-7]依据实测的信息,一旦发现聚合的相轨迹变凸即可判断当前系统若不控制必然发展为失去同步;且该方法可自动给出有效的紧急控制措施,通过控制当前相轨迹的斜率可以使将要失稳的系统变为稳定,从而保证系统的安全稳定运行。该方法将电力系统视为动力学系统的“黑匣子”,不需要知道系统的模型与参数,系统的调节控制作用、时变参数等影响都已经体现在“黑匣子”的输出即发电机的受扰轨迹中,在已知各发电机机械

惯性常数的前提下,实时测量“黑匣子”的输出并在需要时紧急控制“黑匣子”的输入即发电机注入系统功率和负荷功率,即可保证电力系统的稳定性。

作为基于相轨迹凹凸性的暂态稳定性闭环控制方法研究的一个阶段性成果,文献[2]提出了一种暂态不稳定性综合判据,有效提高了多机系统暂态不稳定性判断的可靠性。但在其应用过程中,有学者认为“在将二维自治系统中的相轨迹凹凸性理论推广到多机系统中时,分群不正确及等值单机系统参数的时变性均会导致方法将稳定误判为失稳”^[21],笔者对该研究算例进行了分析,并基于文献[21]所做的研究,进一步对基于相轨迹凹凸性的暂态稳定性闭环控制方法在理解和应用中容易出现的问题进行了详细的剖析,分析和比较了算例中不同因素对判断结果的影响。

1 实时分群及相轨迹分段聚合是实现系统稳定性正确判断的前提和关键

1.1 多机系统的实时分群和相轨迹分段聚合

多机系统在暂态过程中的实时分群和正确等值是形成相轨迹进而分析其凹凸性、判断系统稳定性的前提和关键。文献[2]指出,实时分群的基本过程主要分为下面 2 个步骤。

a. 实测 WAMS 每一个新时刻数据更新后,按照功角从大到小的顺序对发电机进行排序。

b. 计算步骤 a 中的发电机序列中相邻 2 台机组的功角之差,选出最大的功角间隙作为分割线,间隙上面的机群为超前机群 S,间隙下面的机群为落后机群 A。即机组分群必须是采用 WAMS 每一时刻更新后测量数据的实时分群,而非基于某固定时刻 WAMS 测量数据的固定分群。

实时分群保证了在暂态稳定实时判别过程中,分群模式是根据当前功角最大间隙不断地刷新为两群,而所有的参数时变性集中体现在当前的功角与角速度中。只有在当前的分群模式(含义为如果下一

收稿日期:2017-04-07;修回日期:2017-06-27

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900603)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2016YFB0900603)

时刻不控制任其发展,系统将会由当前两群驱动从而失去同步)下的聚合相轨迹的几何特征满足失稳判据时才将其判定为将会失去暂态稳定,启动控制措施。考虑到扰动清除后短时间内机组未明显摆开、机组回摆过程中功角交织以及扰动并未使得功角间隙明显增大等情况,采用了分群功角启动门槛值以提高数值运算的可靠性和避免不必要的运算。大量的仿真算例验证了实时分群方法可有效提高实时控制的可靠性。

文献[21]中基于算例中系统受扰初期仿真数据的固定分群,未重视实时分群及相轨迹分段聚合,进而得到基于相轨迹凹凸性的暂态稳定性闭环控制方法存在“扰动初期发电机分群困难,且不正确的分群会导致等值系统相轨迹呈现复杂特性,而非理想的凹凸性,可能将稳定案例误判为失稳”的结论,这是对该方法应用中存在的误区。下面将通过具体的算例来进行对比分析。

1.2 分群方法影响分析

本文参考文献[21],采用图 1 所示的 IEEE 39 节点系统,复现算例 1:0 s 时母线 21、22 之间线路靠近母线 21 侧发生三相短路,0.1 s 时切除故障线路。系统的发电机功角曲线如图 2 所示。

按照文献[2]给出的实时分群方法复现上述算例 1,表 1 给出了 0.1~3.5 s 内各个时段分群的结果。可以看出,在 0.1~3.5 s 内交替出现了 3 种分群模式,因此系统暂态稳定判断使用的相轨迹是由不同分群模式下的部分相轨迹分段组成,如图 3 所示,图中 $\Delta\omega$ 为角速度(标么值,后同)。

按照时间序列,使用对应的分群聚合模式计算得

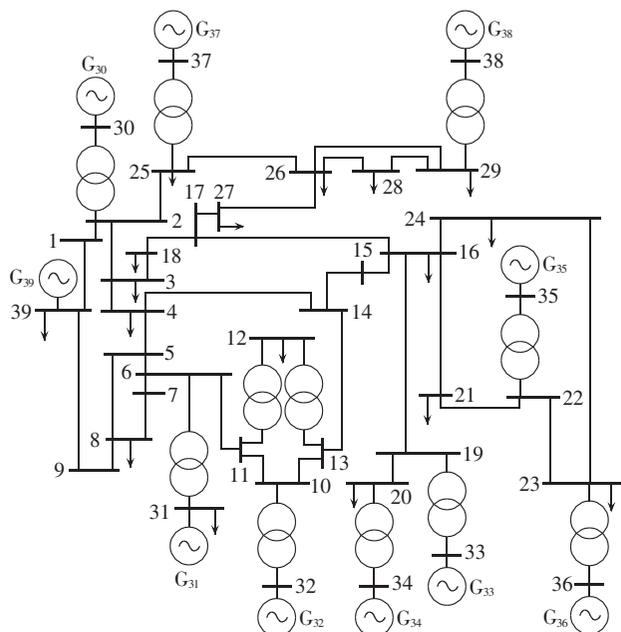


图 1 IEEE 39 节点系统拓扑结构

Fig.1 Topology of IEEE 39-bus power system

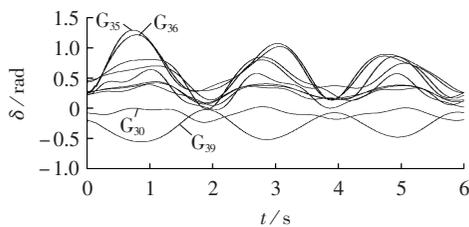


图 2 算例 1 惯性中心坐标下的功角曲线

Fig.2 Power angle curves of generators in COI for Case 1

表 1 算例 1 不同时刻对应的机组实时分群结果

Table 1 Generator grouping results of Case 1 for different moments

时间段/s	超前机群	滞后机群	模式
0.1~0.4	G ₃₁ —G ₃₈	G ₃₀ ,G ₃₉	模式 1
0.42~1.34	G ₃₀ —G ₃₈	G ₃₉	模式 2
1.36~1.70	G ₃₁ —G ₃₈	G ₃₀ ,G ₃₉	模式 1
1.72~1.96	G ₃₀ —G ₃₈	G ₃₉	模式 2
1.98~2.06	G ₃₅ ,G ₃₆	G ₃₀ —G ₃₄ ,G ₃₇ —G ₃₉	模式 3
2.08~2.48	G ₃₁ —G ₃₈	G ₃₀ ,G ₃₉	模式 1
2.50~3.08	G ₃₀ —G ₃₈	G ₃₉	模式 2
3.1~3.5	G ₃₁ —G ₃₈	G ₃₀ ,G ₃₉	模式 1

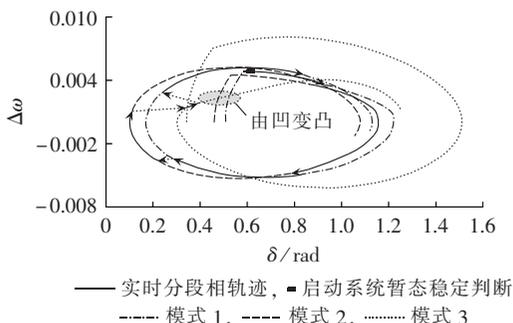


图 3 算例 1 实时分群下的等值相轨迹

Fig.3 Equivalent phase trajectories of Case 1, with real-time generator grouping

到的分段相轨迹均为凹的,对应的凹凸性指标 τ 如图 4 所示。由图 4 可见,凹凸性指标一直小于 0,基于凹凸性的暂态稳定判断方法不会将系统暂态稳定误判为失稳。

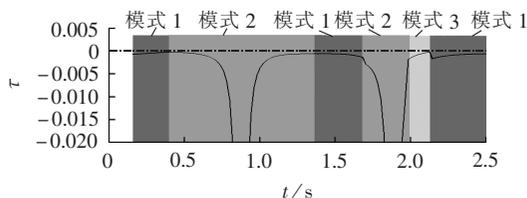


图 4 算例 1 实时分群下的凹凸性指标 τ

Fig.4 Curve of convex-concave index τ of Case 1, with real-time generator grouping

而如果使用固定分群模式下的相轨迹去判断多机系统暂态稳定性[21],无论哪种模式的全时段聚合轨迹都有可能由凹变凸的时段,进而导致误判。如图 3 所示,在 2.1 s 时,分群模式 3 对应的相轨迹由凹变凸。然而在此时段,由最大功角间隙确定的分

群模式应该是模式 1,对应的聚合相轨迹一直处于凹区域内。

算例分析再次验证了实时分群方法^[2]对保证准确的暂态稳定判断的必要性和重要性。

2 摇摆曲线计算与相轨迹聚合必须保证模型参数的一致性

2.1 多机系统的暂态不稳定综合判据

为提高多机系统暂态稳定判断的可靠性,文献^[2]在第 2 节中对轨迹凹凸性判据进行了拓展。因为目前尚无完美的理论方法可实际用于多机系统稳定性控制,该节着重讲述了将理想单机无穷大系统下基于相轨迹凹凸性的暂态稳定性判别方法^[1]应用于多机实际系统时,考虑到系统参数的时变性导致其功率并非严格按正弦函数变化,从而可能影响相轨迹在拐点曲线附近随时间变化的方向场。为了防止误判,文献^[2]提出了 $\Delta P-\delta$ 相平面的方向场指标 μ ,将其作为稳定性判别的辅助判据。当相轨迹由凹变凸($\tau > 0$)时,表明相轨迹已经进入凸区域,同时若方向场指标 $\mu > 0$ 则表明相轨迹在拐点邻域内会继续向凸区域发展,短期内不会返回到凹区域,系统失稳的可能性将非常大。分析表明,辅助判据的引入能减少对不稳定事件的误判,并且不会影响暂态不稳定的检测速度。因此,通过暂态不稳定综合判据($\tau > 0$ 且 $\mu > 0$)能够有效地避免因参数时变性而导致对多机系统稳定性的误判。

文献^[21]基于其算例结果认为基于相轨迹凹凸性的暂态稳定性闭环控制方法“在应用于多机系统时,等值单机系统参数的时变性会使得轨迹呈现复杂特性,甚至出现毛刺,从而将稳定案例误判为失稳”。笔者分析后发现,文献^[21]算例结果出现误判的原因在于其进行相轨迹聚合时使用的发电机机械惯性时间常数与数值仿真时采用的机械惯性时间常数不一致。下文将进行具体的算例比较分析。

2.2 发电机机械惯性时间常数影响分析

在图 1 所示系统中复现文献^[21]算例 2:在 0 s 时,母线 1、2 间线路靠近母线 1 侧发生三相短路,0.58 s 时切除故障线路,系统的发电机功角曲线如图 5 所示。本算例实时分群的结果为 G_{39} 为滞后机群,

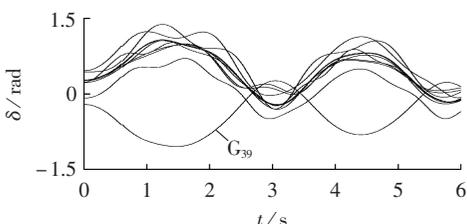


图 5 算例 2 惯性中心坐标下的功角曲线
Fig.5 Power angle curves of generators in COI for Case 2

其余机组为超前机群,可见系统是暂态稳定的。

基于图 5 所示功角曲线,本文聚合的等值相轨迹及相应的凹凸性指标分别如图 6、图 7 中虚线所示,凹凸性指标表明系统稳定,判断是正确的;但同样基于图 5,文献^[21]给出了不同的等值相轨迹及相应的凹凸性指标,分别如图 6、7 中实线所示,并指出在 0.98 s 凹凸性指标满足失稳判据,从而认为基于相轨迹凹凸性的暂态稳定判断方法出现误判。

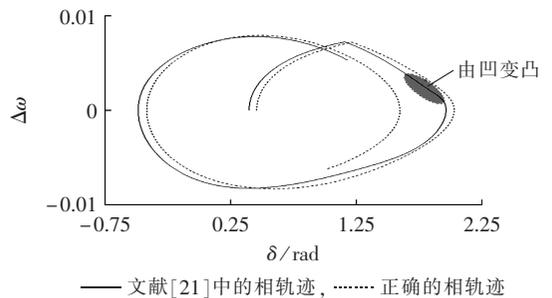


图 6 算例 2 等值相轨迹

Fig.6 Equivalent phase trajectories of Case 1

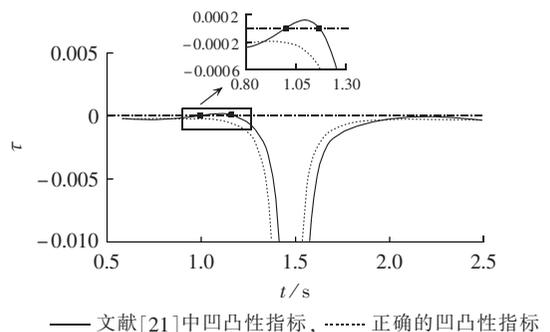


图 7 算例 2 凹凸性指标 τ

Fig.7 Curve of convex-concave index τ of Case 2

需要强调的是,相轨迹聚合时使用的发电机组机械惯性时间常数必须与摇摆曲线计算时的相同。发电机组转动动能 W_K 与机械惯性时间常数 T_J 的关系为 $T_J = 2W_K / S_N$ (S_N 为基准容量)。根据 BPA 软件使用说明,对未填写基准容量的发电机组均默认采用系统基准容量 ($S_N = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$) 进行 W_K 与 T_J 间的归算。根据文献^[21]作者提供的 IEEE 39 节点系统的 BPA 软件参数可知,该文进行摇摆曲线计算时并未填写发电机组的基准容量,即仿真计算中采用了默认的系统容量 $S_N = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 进行发电机组 T_J 归算。如果采用此 T_J 进行相轨迹聚合会得出如图 6、图 7 中虚线所示结果。而文献^[21]在计算聚合相轨迹时采用发电机当前有功出力作为基准值进行 W_K 到 T_J 的归算,导致结果存在偏差。

文献^[21]算例使用的 W_K 和 T_J 如表 2 所示,其中第 3 列为笔者按默认系统容量 $S_N = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 归算的 T_J 值,与国际通用的 IEEE 39 节点系统中发电机的惯量^[22]一致;其他数据由文献^[21]作者提供,其中第 5 列为按照发电机当前出力归算的 T_J 值 (G_{36} 的

表 2 文献[21]算例使用的 W_k 和 T_j
Table 2 Values of W_k and T_j in Reference[21]

发电 机	BPA 仿真用 W_k/MJ	按默认 S_N 折算的 T_j/s	发电机当前 出力/MW	文献[21]按发电机 出力折算的 T_j/s
G ₃₀	4200	84	250	33.6
G ₃₁	3030	60.6	520	11.6
G ₃₂	3580	71.6	650	11
G ₃₃	2860	57.2	632	9.05
G ₃₄	2600	52	508	10.24
G ₃₅	3480	69.2	650	10.7
G ₃₆	3640	52.8	560	9.43(13)
G ₃₇	2430	48.6	540	9
G ₃₈	3450	69	830	8.31

T_j 下文会进一步说明),它与 BPA 仿真计算摇摆曲线所用的 T_j (即表中第 3 列)不一致,聚合后的相轨迹已经不能反映原系统的动态特性。

2.3 相轨迹毛刺的讨论

文献[21]认为系统参数的时变特性会导致相轨迹“出现毛刺”,从而可能导致对系统稳定性的误判。对此,笔者再次解释文献[2]中式(7)的含义,该式中间的微分表达式只是为了阐述概念,而后续的非微分表达式才是算法表达式。采用差分值计算微分,获得的曲线一般是不光滑的,通常需要对差分值进行处理,以尽量改善曲线的光滑性。

由上述分析可见,在计算两群聚合相轨迹过程中采用与仿真计算摇摆曲线不一致的发电机机械惯性时间常数 T_j ,将会导致文献[21]中算例 2 的误判。

3 算例系统其他参数的影响分析

a. 原 IEEE 39 节点算例系统为基准频率 60 Hz 系统(多文献使用的标准测试系统),系统参数以基准频率给出。文献[21]直接将其用于基准频率 50 Hz 系统,将产生下述影响。

同步发电机的机械惯性时间常数(单位为 s)定义为:

$$T_j = \frac{2W_k}{S_N} = \frac{J\Omega_0^2}{S_N} = \frac{J}{S_N} \left(\frac{2\pi f}{p} \right)^2$$

其中,各符号含义从习惯。

60 Hz 下的惯性时间常数用于 50 Hz 测试系统时,应该乘以一个转换系数,即:

$$T_{j,50Hz} = T_{j,60Hz} \times \frac{25}{36}$$

其他的电感参数等也应该进行折算。

b. 文献[21]提供的仿真数据与文献[21]中图 2 的功角曲线不一致。图 2 中功角最大的 2 台机组编号应该是 G₃₅ 和 G₃₆,而不是 G₃₆ 和 G₃₄。这在实际系统中相当于同步相量测量单元(PMU)采集数据时数据与机组编号不匹配,不仅会影响暂态稳定性判断结果的准确性,还有可能在实施紧急控制措施时,控制指令下达到错误的机组上。错误地执行紧急控

制措施不仅不能阻止系统的暂态失稳,反而会恶化系统的稳定性,引起更严重的后果。PMU 数据的可靠性是基于实测数据的暂态稳定性预测和实时控制方法能够应用在实际系统中的前提。

c. 表 2 中 G₃₆ 的机械惯性时间常数如果采用文献[21]中的折算方法,应该为 13 s 而非 9.43 s。机械惯性时间常数折算错误会导致聚合相轨迹不能反映原系统真实的稳定性,从而影响暂态稳定性判别的准确性。

4 结论

a. 实时分群及相轨迹分段聚合是实现系统稳定性正确判断的前提和关键,应重视实时分群的必要性和重要性。

b. 摇摆曲线计算与相轨迹聚合必须保证模型参数的一致性,若在聚合发电机群时机组惯性常数取值不当,将使得聚合后的相轨迹曲线不能反映原系统的暂态稳定性。

基于响应的暂态稳定性闭环控制^[1-7]在 IEEE 39 节点系统、IEEE 145 节点系统等测试系统中的大量仿真验证了该方法在多机系统的适用性。依托于国家电网公司重大专项项目,基于相轨迹凹凸性的暂态不稳定识别方法在两华、三华等实际大电网稳定性紧急控制仿真研究中也得到了很好的验证。

与此同时,基于轨迹凹凸性进行暂态稳定判断的研究工作也得到了同行的关注与借鉴^[23-28],这不仅有利于理论方法的传播,更有助于方法理论的发展与完善。从理论阶段到应用阶段尚需要解决很多问题,需要积极地探索解决。目前面临的主要现实问题是应该积极地完善 WAMS 信息系统,使之达到用于实时控制的要求。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张保会,杨松浩,王怀远,等. 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方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):1-6.
ZHANG Baohui, YANG Songhao, WANG Huaiyuan, et al. Closed-loop control of power system transient stability(2): transient instability detection method of multi-machine power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 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(三)——基于预测响应的暂态不稳定闭环控制启动判据[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):1-6.

- ZHANG Baohui, YANG Songhao, WANG Huaiyuan. Closed-loop control of power system transient stability(3): initiation criterion of transient stability closed-loop control based on predicted response of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 1-6.
- [4] 张保会, 王怀远, 杨松浩. 电力系统暂态稳定性闭环控制(四)——切机控制效果的要素分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 1-6.
- ZHANG Baohui, WANG Huaiyuan, YANG Songhao. Closed-loop control of power system transient stability(4): analysis of elements influencing control effect of generator shedding[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 1-6.
- [5] 张保会, 王怀远, 杨松浩, 等. 电力系统暂态稳定性闭环控制(五)——控制量的实时计算[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(12): 1-5.
- ZHANG Baohui, WANG Huaiyuan, YANG Songhao, et al. Closed-loop control of power system transient stability(5): calculation of control quantity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12): 1-5.
- [6] 张保会, 王怀远, 杨松浩. 电力系统暂态稳定性闭环控制(六)——控制地点的选择[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 1-5.
- ZHANG Baohui, WANG Huaiyuan, YANG Songhao. Closed-loop control of power system transient stability(6): control location selection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 1-5.
- [7] 张保会, 王怀远, 杨松浩. 电力系统暂态稳定性闭环控制(七)——实现方案与控制效果[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 1-7.
- ZHANG Baohui, WANG Huaiyuan, YANG Songhao. Closed-loop control of power system transient stability(7): implementation scheme and control effect[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 1-7.
- [8] 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]. Chinese Power, 1999, 32(12): 50-52.
- [9] 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. Ascertain fault line based on the jump of angle of power factor[J]. Relay, 2000, 28(1): 3-5.
- [10] 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, 20(2): 1-3.
- LÜ Zhilai, ZHANG Baohui, HA Hengxu. Research on transient stability margin based on trajectory analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(2): 1-3.
- [11] 吕志来, 张保会, 哈恒旭. 一种变结构的时间序列预测算法及其在电力系统暂态稳定预测中的应用[J]. 电工技术学报, 2002, 17(3): 82-87.
- LÜ Zhilai, ZHANG Baohui, HA Hengxu. A variable structure predictive algorithm for times series and its application to real-time transient stability prediction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(3): 82-87.
- [12] 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.
- [13] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 5-10.
- ZHANG Baohui. Strengthen the protection relay and urgency control system to improve the capability of security in the interconnected power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 5-10.
- [14] 张保会, 谢欢, 于广亮, 等. 基于广域轨迹信息的多机系统暂态不稳定性快速预测方法[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 53-58.
- ZHANG Baohui, XIE Huan, YU Guangliang, et al. Fast prediction method for multi-machine system transient instability based on wide area trajectory information[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 53-58.
- [15] 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.
- [16] 于广亮, 张保会, 谢欢, 等. 基于广域信息的非线性全局综合控制器[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 26-32.
- YU Guangliang, ZHANG Baohui, XIE Huan, et al. A nonlinear global integrated controller based on wide-area measurement information[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 26-32.
- [17] 谢欢, 张保会, 于广亮, 等. 基于轨迹几何特征的暂态不稳定性识别[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 16-22.
- XIE Huan, ZHANG Baohui, YU Guangliang, et al. Transient instability detection based on trajectory geometrical characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 16-22.
- [18] 王怀远, 张保会, 杨松浩, 等. 电力系统暂态稳定切机控制策略表的快速整定方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 68-72.
- WANG Huaiyuan, ZHANG Baohui, YANG Songhao, et al. Fast setting method of generator tripping strategy tables in transient stability control of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 68-72.
- [19] 王怀远, 张保会, 杨松浩, 等. 基于相平面特性的切机切负荷紧急控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4144-4152.
- WANG Huaiyuan, ZHANG Baohui, YANG Songhao, et al. Combined emergency control strategy of generator tripping and load shedding based on the characteristics of state plane[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4144-4152.
- [20] 苏福, 杨松浩, 王怀远, 等. 电力系统暂态稳定时域仿真快速终止算法研究[J/OL]. (2017-02-16)[2017-04-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20170216.0925.007.html>.
- [21] 赵晋泉, 张盼, 章玉杰. 基于相平面轨迹凹凸性的暂态稳定性判别方法评述[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 45-50.
- ZHAO Jinquan, ZHANG Pan, ZHANG Yujie. Review on transient instability detection method based on convexity and concavity of phase trajectory[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 45-50.
- [22] PAI M A. Energy function analysis for power system stability[M]. Dordrecht, Holland: Kluwer Academic Publishers, 1989: 209-210.
- [23] 吴为, 汤涌, 孙华东, 等. 利用实测响应信息的暂态功角失稳实时判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 171-178.
- WU Wei, TANG Yong, SUN Huadong, et al. Real-time transient instability criterion based on post-disturbance response data[J].

- Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34):171-178.
- [24] 顾卓远, 汤涌, 孙华东, 等. 一种基于转速差-功角差变化趋势的暂态功角稳定辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 65-72.
GU Zhuoyuan, TANG Yong, SUN Huadong, et al. An identification method for power system transient angle stability based on the trend of rotor speed difference-rotor angle difference[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31):65-72.
- [25] 顾卓远, 汤涌. 基于响应信息的电压与功角稳定实时紧急控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28):4876-4885.
GU Zhuoyuan, TANG Yong. Response-information based real-time power system voltage stability and angle stability emergency control scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4876-4885.
- [26] 岑炳成, 唐飞, 廖清芬, 等. 应用功角空间降维变换的相轨迹判别系统暂态稳定性[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2726-2734.
CEN Bingcheng, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Transient stability detection using phase trajectory obtained by dimension reduction transform of power angles[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11):2726-2734.
- [27] 郑超, 苗田, 马世英. 基于关键支路受扰轨迹凹凸性的暂态稳定判别及紧急控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10):2600-2610.
ZHENG Chao, MIAO Tian, MA Shiyong. Transient stability identification and emergency control based on the convex characteristic of the key branch's disturbed trajectory[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10):2600-2610.
- [28] 吴为, 饶宏, 洪潮, 等. 利用相平面轨迹特性的暂态稳定控制切机负效应的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4572-4580.
WU Wei, RAO Hong, HONG Chao, et al. Theoretical research on negative effect problems caused by generator tripping in transient stability control based on trajectory characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17):4572-4580.

作者简介:



杨松浩

杨松浩(1989—),男,山东莱芜人,博士研究生,从事电力系统暂态稳定性判别和控制方面的研究(E-mail:songhaoyang@stu.xjtu.edu.cn);

王怀远(1987—),男,福建泉州人,博士,从事电力系统闭环控制方面的研究(E-mail:wanghuaiyuan@stu.xjtu.edu.cn);

苏福(1992—),男,重庆人,硕士研究生,从事电力系统暂态稳定性判别和控制方面的研究(E-mail:susufufu@stu.xjtu.edu.cn);

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)。

Analysis and comparison of transient instability detection methods based on convexity and concavity of phase trajectory

YANG Songhao, WANG Huaiyuan, SU Fu, ZHANG Baohui

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The transient instability identification and control based on the convexity and concavity of phase trajectory is a new method in recent years, which is expected to be applied in the emergency control of power system based on the PMU information. The key technical steps of real-time generator grouping and the necessity of correct use of segmented phase trajectory are emphasized when this method is applied to multi-machine power system. In addition, some misunderstandings about its applications reported in related references are analyzed and the matters needing attention for the further comprehension and application of this method are deeply elaborated.

Key words: phase trajectory; convexity and concavity; transient instability detection; real-time generator grouping; segmented phase trajectory; transient; stability