编者按语:

通过电力系统广域测量系统(WAMS),可以实时获得系统中各发电机的功角及其他状态量,比利用数值仿真得到的更为 准确、真实,使得依据电力系统响应的实时控制成为可能。本组"电力系统暂态稳定性闭环控制"(7篇)论文,以WAMS为实 现基础,提出了观测功角、角速度相轨迹凹凸性判别暂态稳定性的理论,用相轨迹凹凸性变化指标快速预测稳定性,代替长 时间观测功角摇摆;在多机系统中,提出实时分群、凹凸性随时间的变化速度指标,保证失稳判据的有效性;采用滚动预测未 来轨迹的方法,提高不稳定判别速度,为提高控制效果赢得更多的时间;发现了相轨迹斜率与阻止不稳定需要的切机量之间 的关系,给出了维持暂态稳定需要的最小切机量实时计算方法,以及有效切机控制机组筛选和优先分配的方法,保证切机控 制的高效性。整组文章对暂态不稳定预测,最小控制实时计算、分配,闭环控制系统的实现技术等进行了全面探讨,展现了电力 系统暂态稳定闭环控制后坚强智能电网的前景,欢迎各位专家讨论、争鸣,充分利用现代电网通信条件,开发更多有价值的 理论和技术,为电力系统技术发展做出贡献。

电力系统暂态稳定性闭环控制(五)—— 控制量的实时计算

张保会1,王怀远1,杨松浩1,马世英2

(1. 西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049;2. 中国电力科学研究院,北京 100192)

摘要:基于轨迹的凹凸性几何特征分析可知,不稳定的相轨迹斜率随角度逐步变大,欲使不稳定的轨迹向 稳定的轨迹变化,施加的控制需要满足轨迹的斜率在功率平衡点前持续变小。据此提出了一种基于切机时 刻相轨迹斜率和功率平衡点角度的最小切机量近似计算方法,并且给出了根据实测信息计算等值功率平衡 点的近似计算方法。以单机无穷大系统和某联网电网系统为例,验证了理论的有效性。

关键词: 电力系统: 暂态; 稳定性; 相轨迹凹凸性; 相轨迹斜率; 控制量; 闭环控制

中图分类号: TM 712 文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.12.001

0 引言

在电力系统遭受大扰动^[15]快速判别出暂态不稳 定后,立即正确算出需要的控制量^[6-11],是保证控制 有效性和经济性^[12-13]的重要环节。文献[6]论述了离 线和实时准确计算最小切机量的理论和实际困难, 本文将探讨切机量近似计算的原理^[14]与方法。

文献[1]提出了基于相平面轨迹凹凸性变化的 暂态不稳定性判别理论,文献[2]经过增加判别轨迹 穿越拐点时变化率方向场的符号,将该理论推广至 多机系统并做了相应的验证。分析轨迹的凹凸性特 征及角速度与功角的关系,不稳定的系统轨迹在其 通过动态鞍点(DSP)^[15]时,对应的角速度不为0,系 统不会回摆。而稳定的轨迹在其达到动态鞍点前其 角速度一定会存在为0的时刻(对应最大摇摆角), 并且发生回摆。本文的学术思想就是通过切机措施 使得不稳定的系统轨迹在其动态鞍点处(或前)的角 速度降为0,系统开始回摆。

收稿日期:2014-07-30;修回日期:2014-11-13

基金项目:国家电网公司大电网重大专项资助项目课题(SGCC-MPLC030-2012)

通过控制改变轨迹的发展使其由不稳定变得稳 定.需要进一步研究控制量与轨迹发展的关系.本文 首先研究相轨迹斜率的变化趋势与轨迹凹凸性变化 的关系,进而研究相轨迹斜率与控制量的关系,解决 基于实测的轨迹信息最小控制量的实时近似计算问 题。而最小控制量与允许的系统最大摇摆角有关,本 文提出2种方法:第1种方法是给定一个最大摇摆角, 通过切机控制使得系统轨迹在给定的最大摇摆角处 返回,系统保持稳定,所给的系统的最大摇摆角必须 小于不稳定平衡点角度,否则计算出的控制量无法使 系统恢复稳定,其优点是最大摇摆角可控,可根据更 复杂的控制要求调整:第2种方法是假设切机控制 前后两区域间电磁功率曲线未发生变化或者变化幅 度很小,最大摇摆角自动计算,保持暂态稳定。实际 电网的规模非常大,等值为两群系统后切除少量机 组对于两群间电磁传输曲线的影响较小,不稳定平 衡点的变化对于切机量的影响可以忽略不计,可以做 到完全自动计算。在单机无穷大系统和三华联网系 统进行了仿真,验证了本文算法的有效性。

1 相轨迹斜率的时间特性与稳定性关系分析

回顾文献[1]用相轨迹几何特征判别暂态不稳 定的有关判据,相轨迹斜率为:

Project supported by State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid(SGCC-MPLG030-2012)

$$k = \frac{\mathrm{d}\Delta\omega}{\mathrm{d}\delta} = \frac{\mathrm{d}\Delta\omega/\mathrm{d}t}{\mathrm{d}\delta/\mathrm{d}t} = \frac{\Delta P}{M\Delta\omega} \tag{1}$$

相轨迹拐点为:

$$l = \frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}\delta} = \frac{\mathrm{d}^2\omega}{\mathrm{d}\delta^2} = 0 \tag{2}$$

不稳定判据为:

$$\tau(t) = l\Delta\omega > 0 \tag{3}$$

其离散表达式为:

$$\tau(i) = k(i) - k(i-1)$$

$$k(i) = \frac{\Delta\omega(i) - \Delta\omega(i-1)}{\delta(i) - \delta(i-1)}$$
(4)

其中, $\Delta\omega(i)$ 、 $\delta(i)$ 分别为系统的角速度偏差、角度。在 $\Delta\omega-\delta$ 相平面内,当 $\tau(i)<0$ 时,相轨迹相对于稳定平 衡点的几何特征是凹的,系统稳定;若某时刻 $\tau(t)>0$, 相平面轨迹从凹区域穿入凸区域,系统将失去稳定^[5]。

对于图 1 所示系统,在其输电线路 L₂ 上发生短路,0.25 s 跳开故障线路切除故障,系统临界稳定, 0.3 s 跳开故障线路,系统不稳定。对于不稳定的故障,在 0.43 s 时完成切除不同比例的机组,切除机组 容量不足时,系统依然失稳,对应的角速度偏差、相 轨迹斜率曲线如图 2 所示,图中角速度偏差为标幺值。



图 1 单机无穷大系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of a SMIB system





考察相轨迹斜率 k(t)随时间的变化方向,对于 稳定的轨迹,其变化率持续减小并在最大摇摆角处 发生符号跃变,因为在最大摇摆角处角度随时间变化 率为 0,而角速度偏差随时间变化率改变符号,轨迹 不会到达拐点,轨迹回摆,系统不会失稳。对于不稳 定的轨迹,其变化率并非持续减小,在拐点处开始增 大并在功率平衡点处开始大于 0。对于经切机控制 后的轨迹,切机使得相轨迹斜率突然减小,切机量越 大斜率减小越多。如果切机量不足,在轨迹拐点处斜 率开始增大并在功率平衡点处开始大于 0,系统仍然 失稳;如果切机量足够,相轨迹斜率持续变小,在最 大摇摆角处发生符号跃变,轨迹不会到达拐点,轨迹 回摆,系统经切机控制后稳定;对于使得系统稳定的 最小切机量控制后的轨迹,相轨迹斜率持续变小,并 在功率平衡点处发生符号跃变,轨迹回摆,系统经切 机控制后临界稳定。

定理 3:在功率平衡点前,欲使相轨迹由凸区域 向凹区域运动且不再回到凸区域,则相轨迹斜率持 续变小。

证明:相轨迹斜率 $k = \frac{d\Delta\omega}{d\delta}$,其持续变小表达为:

$$\frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}\delta} \frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t} = l\Delta\omega = \tau < 0 \tag{5}$$

等价于文献[1,4]所提定理1,相轨迹一直运行在凹 区域内,不再回到凸区域,系统稳定,故定理3得证。

2 切机控制量的计算

对于稳定的系统,角速度偏差在最大摇摆角处 为0,相轨迹在该点开始回摆;而不稳定的系统,角 速度偏差在功率平衡点处达到最小,但不为0,经过 不稳定平衡点之后,角速度偏差继续增大,从而失稳。 对于将要失稳的系统,通过切机控制使得系统在指 定的最大摇摆角或功率平衡点处角速度偏差为0,才 能恢复稳定,以此为控制目标计算所需切机控制量。

对其相轨迹斜率进行积分,取积分下限为切机时 刻的功角 δ_a ,积分上限为功角 δ_b ,可以得到:

$$\int_{\delta_{a}}^{\delta_{b}} k(t) \mathrm{d}\delta = \int_{\delta_{a}}^{\delta_{b}} \frac{\mathrm{d}\Delta\omega}{\mathrm{d}\delta} \mathrm{d}\delta = \Delta\omega_{b} - \Delta\omega_{a}$$
(6)

式(6)表达了相轨迹斜率与角速度偏差间的关系,对于稳定的系统,当 δ_b 对应于系统的最大摇摆角时,对应的角速度偏差 $\Delta\omega_b$ 为0时,相应为式(6)的第一项为0。再次回顾式(1),k(t)表达了不平衡功率与角速度偏差的关系,如果能够求得稳定控制需要的k(t),进而可求得切机控制量。

观察图 2 中切机控制后的 k(t),它是非线性变 化的,切机量越大,k(t)向负方向变化率越大,对应 不同的最大摇摆角处角速度偏差为 0,需要的切机量 不同。当在功率平衡点处角速度偏差为 0 时,对应一 个临界最小切机量,则该切机量就是使得系统由不稳 定变稳定需要的最小切机量,记为:

$$\int_{\delta_{c}}^{\delta_{u}} k(t) \mathrm{d}\delta = -\Delta\omega_{c} \tag{7}$$

其中,δ。为切机时刻系统的功角;δ_u为系统的不稳定 平衡点功角。

若能得知最小切机量在切机时刻对应的相轨迹 斜率,通过式(1)就能求得系统所需要的最小切机 量。由于 k(t)非线性变化,且 k(t)值的求取显然与计 算需要的切机量构成了一个"环锁"问题^[7],因此需 要近似计算。假定切机控制后至最大摇摆角前,相轨 迹斜率是常数,采用一个恒定不变的 k'值来代替式 (7)中 k(t),可以得到:

$$\int_{\delta_{c}}^{\delta_{u}} k' d\delta = k' (\delta_{u} - \delta_{c}) = -\Delta \omega_{c}$$

$$k' = \frac{-\Delta \omega_{c}}{\delta_{u} - \delta_{c}}$$
(8)

显然欲求得 k',需要知道切机时刻的角度与角速 度偏差,可通过实时测量得到;最大摇摆角可以给定 或见第 3 节求取方法。采用该近似方法得到的 k'要 略小于最小切机量对应的切机时刻的相轨迹斜率, 因此通过 k' 求取的切机量要略大于最小切机量,结 果偏保守。

对于单机系统,可以假定切机比例为 λ ,切除出 力的同时也减小了惯性,回顾式(1),切机后k'与切 机量 λ 的对应关系为:

$$k' = \frac{(1-\lambda)P_{\rm m} - P_{\rm ec}}{(1-\lambda)M\Delta\omega_{\rm c}}$$
(9)

将式(8)代入式(9)并变换得到:

$$\lambda = 1 - \frac{P_{\rm ec}}{P_{\rm m} - M\Delta\omega_{\rm c}k'} \tag{10}$$

其中, P_{ec} 为电磁功率在切机时刻 T_{c} 的值; $\Delta \omega_{c}$ 为角 速度偏差在切机时刻 T_{c} 的值。当已知k'时,用式(10)可得切机量。

对于实际的多机系统,按照文献[2]的方法将其 等值为超前群 S 与滞后群 A 两群,进而等值成单机系 统。为快速求取切机量,近似认为切机后系统的惯量 未发生变化,可以得到式(11)计算超前群 S 所需要 的切机量:

$$\Delta P_{\rm m} = P_{\rm ms} - \left[\frac{k' M M_{\rm T} \Delta \omega + (P_{\rm ma} - P_{\rm ea}) M_{\rm s}}{M_{\rm a}} + P_{\rm es}\right] \quad (11)$$

其中, P_{ms} 和 P_{es} 分别为超前群S在切机时刻的等值 机械功率和电磁功率; P_{ma} 和 P_{ea} 分别为滞后群A在 切机时刻的等值机械功率和电磁功率;M为系统所 有机组的总惯量; M_{T} 为等值单机系统的惯量; M_{s} 和 M_{a} 分别为超前群S和滞后群A的总惯量; $\Delta \omega$ 为等 值单机系统在切机时刻的角速度偏差。

3 最大摇摆角的求取

控制量计算的表达式中,其他的变量均可以通过 WAMS得到,而切机后的最大摇摆角需要通过给定 或自动计算事先获得,采用2种方法得到系统的最大 摇摆角。

方法 1:最大摇摆角定在切机后系统的功率平衡 点(也称不稳定平衡点),进行自动计算。对于实际的 多机电力系统,等值单机无穷大系统的电磁传输功 率可用时变的功角函数表达,如式(12)所示,机械输 入功率在短时间内认为不变。当执行切机操作时,认 为电磁功率没有发生变化,而机械功率按切机量相 应地减少。

 $P_e = P_e(t) + \lambda_1(t) \sin \delta + \lambda_2(t) \cos \delta$ (12) 其中, $P_e(t) \cdot \lambda_1(t) \cdot \lambda_2(t)$ 为待辨识的时变参数。就某 一确定时刻的系统运行状态而言,只要等值输电断面 中不发生大的网络操作,参数在短时间内可当成定常 不变,即只需要利用判出不稳定时刻前的等值实测 功率差,利用最小二乘法辨识一次参数,确定出电磁 传输功率。

对于切机后的功率平衡点的求取,需要已知切机 量,因此可以通过迭代的方法求取。迭代的步骤如下:

a. 完成电磁传输功率的预测;

b. 初始迭代时,给定切机量为0;

c. 机械输入功率根据切机量而相应地减小;

d. 找到电磁功率和机械功率相等时对应的功 角,即为不稳定平衡点δ_u⁽ⁿ⁾;

e. 通过不稳定平衡点返回计算切机量 $\Delta P_{m}^{(n)}$;

f. 若 $|\delta_{u}^{(n)} - \delta_{u}^{(n-1)}| \leq \varepsilon$ (其中 *n* 为迭代次数, ε 为收 敛条件),则完成迭代计算输出结果,程序结束,反之 返回步骤 **c**。

方法 2:限定系统的最大摇摆角。根据实际系统 的运行控制需要,给定系统允许的最大摇摆角。所选 取的最大摇摆角必须在系统的不稳定平衡点之内, 否则计算出的控制量无法使系统恢复稳定。

4 仿真验证

4.1 单机无穷大系统下的仿真

在 PSASP 仿真软件中搭建如图 1 所示的单机 无穷大系统。发电机采用 E' 恒定模型,初始条件如 下:惯性常数取 19.6 s,不考虑调速调压器作用,正常 运行在功角 46.5°。故障条件为 t=0 在 L₂线路首端 发生三相短路,在不同的时间切除 L₂线路。用文献 [2]的判据以不同的时间判出不稳定,假定延迟 50 ms 完成切机,本文算出的最小切机量与仿真试凑得到的 最小切机量比较见表 1,自动计算获得的最小切机量 比仿真得到的略多,确保了切机后系统稳定。

与表1的故障条件、判别方法相同,表2是限定 系统的最大摇摆角180°计算所需的最小切机量。可 以看出:按照该算法所得的切机量进行切机控制,切 机后的最大摇摆角与所限定的值非常接近,并且不 会超过限定的摇摆角,保证在控制目标内。

4

表 1 自动计算最小切机量准确性校验

Table 1 Accuracy verification of automatically-calculated minimum control quantity

minimum control quantity						
	故障切除	判别失稳	最小切机量/%			
	时间/s	时间/s	本文计算	仿真试凑		
	0.24	稳定	无(稳定)	无(稳定)		
	0.25	0.55	4.36	3.1		
	0.26	0.53	14.7	12		
	0.27	0.50	22.1	20		
	0.28	0.50	30.2	29		
	0.29	0.48	36.1	35		
	0.30	0.43	37.6	35		

表 2 限定最大摇摆角得到的切机量

Table 2 Control quantity calculated with restraint of maximum swing angle

_				
	故障切除 时间/s	判别失稳 时间/s	本文算得的 最小切机量/%	最大 摇摆角/(°)
	0.24	稳定	无(稳定)	无(稳定)
	0.25	0.55	7.9	177.9
	0.26	0.53	17.8	177.3
	0.27	0.50	25.3	177.2
	0.28	0.50	34.3	177.4
	0.29	0.48	39.7	179.1
	0.30	0.43	40.4	177.3

4.2 三华联网系统暂态稳定控制仿真

参见文献[2]给出的不稳定判别方法及三华联 网系统。故障场景为0s洪沟—板桥线路发生三相 短路接地故障,0.1s保护装置动作跳开线路,故障清 除。保护装置动作之后的功角曲线如图3所示,系 统依然失稳。



利用文献[2]给出的不稳定判别方法,在 0.94 s 判别出系统不稳定,此时启动控制量计算。认为系统 的不稳定平衡点未发生变化,通过拟合系统的不平衡 功率自动获得不稳定平衡点,计算得到控制量为切除 4568 MW 的机组,延迟 300 ms 后完成切机,图 4 给 出功角摇摆曲线,合适的切机控制后系统稳定。

给定一个等值系统的最大摇摆角为 180°、本文 计算得到的控制量为切除 6992 MW 的机组,切机完 成之后的功角曲线如图 5 所示,等值系统的最大摇 摆角为 177.5°,在限定的系统最大摇摆角内。



图 4 切除 4568 MW 机组后的功角曲线

Fig.4 Power-angle curves after 4568 MW unit is tripped



图 5 切除 6992 MW 机组后的功角曲线

Fig.5 Power-angle curves after 6992 MW unit is tripped

5 结论

电力系统中不稳定的相轨迹其斜率通过拐点后 随角度逐步变大,欲使不稳定的轨迹向稳定的轨迹 变化,施加的控制需要满足轨迹的斜率在功率平衡 点前持续变小。在多机系统中可以认为切机控制后 系统的不稳定平衡点没有发生变化,利用控制前的 功率差拟合来确定控制后的不稳定平衡点,自动计 算切机控制量;也可以给定一个系统最大摇摆角,计 算切机控制量。

仿真结果表明,控制执行后的系统能够不再失 稳,本文的成果解决了控制量实时计算的难题。

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. Closedloop 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] 谢欢. 基于广域动态量测信息的电力系统暂态不稳定性预测理 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.

- [5] 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,
- [6] 张保会,杨松浩,王怀远. 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, YANG Songhao, WANG Huaiyuan. 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.

- [7] 于广亮. 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.
- [8] 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.

[9] 汤涌. 电力系统安全稳定综合防御体系框架 [J]. 电网技术,2012, 36(8):1-5.

TANG Yong. Framework of comprehensive defense architecture for power system security and stability[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 1-5.

- [10] 杨春生,周步祥,林楠,等. 广域保护研究现状及展望[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(9):147-150.
 YANG Chunsheng,ZHOU Buxiang,LIN Nan,et al. Research current status and prospect of wide-area protection[J]. Power
- System Protection and Control,2010,38(9):147-150.
 [11] 鞠平,郑世宇,徐祥,等. 广域测量系统研究综述[J]. 电力自动 化设备,2004,24(7):37-40.
 JU Ping,ZHENG Shiyu,XU Qun,et al. Survey of wide area measurement system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(7):37-40.
- [12] 黄龙祥,苗世洪,赵峰,等.大电网暂态稳定概率评估方法及风险指标研究[J].电力自动化设备,2013,33(11):105-110.
 HUANG Longxiang,MIAO Shihong,ZHAO Feng, et al. Transient stability probability assessment and risk indexes for large scale power systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33 (11):105-110.
- [13] 曹一家,王光增. 电力系统复杂性及其相关问题研究[J]. 电力 自动化设备,2010,30(2):5-10.
 CAO Yijia, WANG Guangzeng. Research on power system complexity and related topics[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(2):5-10.
- [14] 余贻鑫,王成山. 电力系统稳定性理论与方法[M]. 北京:科学 出版社,1999;58-62.
- [15] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1999:30-31.

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);

张保会

王怀远(1987—),男,福建泉州人,博士 研究生,从事电力系统安全稳定控制和广域 信息系统的研究。

Closed-loop control of power system transient stability(5): calculation of control quantity

ZHANG Baohui¹, WANG Huaiyuan¹, YANG Songhao¹, MA Shiying²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The geometric analysis of trajectory convexity shows the slope of unstable phase trajectory increases gradually along with the angle. In order to stabilize the unstable trajectory, its slope should be controlled to become continuously smaller before the power balance point. A method is proposed to approximately calculate the minimum control quantity based on the phase trajectory slope of control point and the angle of power balance point. The equivalent power balance point is calculated approximately based on the measurements. A single machine infinite bus system and an interconnected system are taken as the examples to verify the validity of the introduced theory.

Key words: electric power systems; transients; stability; phase trajectory convexity; phase trajectory slope; control quantity; closed-loop control

 $26(5) \cdot 38-42$