

电力系统振荡解列原理的分析与研究

丛伟, 潘贞存, 肖静, 张荣

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 分析了电网振荡时各电气量的变化规律, 介绍了基于不同电气量变化规律的电网振荡解列判据, 并从间接反映功角、直接测量功角和能量原理的反映三个方面对它们进行了分类, 深入分析了各种判据的特点和适用范围。在此基础上对部分判据进行了改进, 提出了基于有功功率变化量的新型解列判据。最后针对大型复杂电网提出了设计电网解列新判据应注意的问题和解列发展的方向。

关键词: 电力系统振荡; 电网解列; 相角测量

中图分类号: TM 71 文献标识码: A 文章编号: 1003- 4897(2003) 10-0051-05

1 引言

电力系统的振荡解列装置是一种十分重要的保护设备, 其作用是在系统发生危害极大的功率振荡时, 及时准确的在预定的解列点将互联系统解列, 使振荡的系统尽快恢复稳定运行。它是确保电力系统安全运行的最后一道防线, 在电力系统中占有十分重要的位置。

系统振荡时, 两端电势夹角在 $0 \sim 360^\circ$ 之间周期变化, 电流、电压和测量阻抗也随之作周期性的变化。其中, 联络线的电流最大等于发生三相短路时的短路电流, 最小为零; 振荡中心处的电压在电势值和零之间周期变化, 且离振荡中心越远, 变化幅度越小; 测量阻抗的变化轨迹较复杂, 它受系统两端电势大小的影响, 而且在受、送两端, 变化轨迹不同。本文对目前应用于电力系统的各种原理的解列判据进行分析和评价, 找出存在的问题, 指出了建立新判据应注意和考虑的问题, 并预测了电网振荡解列的发展趋势和方向。

2 间接反映功角的解列判据

2.1 电流型解列判据^[1]

设系统振荡时实测电流有效值为 I_{os} , 振荡前负荷电流有效值为 I_L , 由振荡引起的电流变化量为 ΔI , 则有:

$$\Delta I = I_{os} - I_L \quad (1)$$

ΔI 的变化幅度(即 ΔI 的峰、谷差值) ΔI_m 和频率 Δf 反映了振荡的剧烈程度和速度, 解列的动作判据可表示为:

$$\Delta I_m > \Delta I_{set} \quad (2)$$

$$\Delta f > \Delta f_{set} \quad (3)$$

式中, ΔI_{set} 为摆动幅度整定值; Δf_{set} 为摆动频率整定值。

文献[2]对系统振荡时的电流波形进行了分析, 如图1所示。

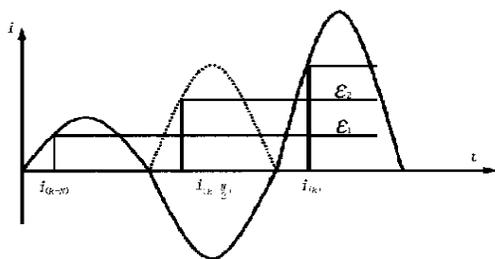


图1 振荡电流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of oscillation current

我们假设以下关系式:

$$\Delta i_{(k)}^{(1)} = |i_{(k)} - i_{(k-N)}| \quad (4)$$

$$\Delta i_{(k)}^{(2)} = \left| \left| i_{(k)} + i_{\left(k - \frac{N}{2}\right)} \right| - \left| i_{\left(k - \frac{N}{2}\right)} + i_{(k-N)} \right| \right| \quad (5)$$

其中, N 为每个周期的采样点数; $i_{(k)}$ 、 $i_{\left(k - \frac{N}{2}\right)}$ 、 $i_{(k-N)}$ 分别为第 k 时刻、 $\left(k - \frac{N}{2}\right)$ 时刻以及 $(k-N)$ 时刻电流的采样值。

如图1所示, 当系统发生振荡时有:

$$\Delta i_{(k)}^{(1)} = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad (6)$$

$$\Delta i_{(k)}^{(2)} = \epsilon_2 - \epsilon_1 \quad (7)$$

(ϵ_1 和 ϵ_2 基本接近)

满足以下条件时认为发生振荡:

$$\Delta i_{(k)}^{(2)} < \epsilon \quad (8)$$

$$\frac{\Delta i_{(k)}^{(1)}}{\Delta i_{(k)}^{(2)}} > K \quad (9)$$

其中 ϵ 、 K 为整定值。

2.2 电压型解列判据^[8,9]

在简单双机系统中,假设两端电势幅值相等,都为 E ,在忽略系统各元件电阻的前提下,得到与振荡中心电压相关的表达式:

$$U_z = E \cos \frac{\delta}{2} \quad (10)$$

$$\frac{dU_z}{dt} = -\frac{1}{2} E \sin \frac{\delta}{2} \cdot \frac{d\delta}{dt} \quad (11)$$

满足以下条件时认为发生振荡:

$$\left| E \cos \frac{\delta}{2} \right| < \epsilon \quad (12)$$

$$\left| dU_z/dt \right| > K \quad (13)$$

该判据相当于在一定滑差下检测出 $\delta > \delta_k$ 。

2.3 阻抗型解列判据^{[6][8][9]}

在3.2所述的前提条件下,可以得到系统视在阻抗 Z_j 的表达式:

$$Z_j = \left(\frac{Z}{2} - Z_{om} \right) - j \frac{1}{2} Z \operatorname{ctg} \frac{\delta}{2} \quad (14)$$

其中, Z 为系统总的联系阻抗; Z_{om} 为测量点的背侧阻抗; δ 为两侧电势的夹角。

由于 Z_j 与 δ 之间的函数关系简单,此类判据在实际中有着广泛的应用,如双阻抗圆型、透镜型判据等。鉴于此类判据应用广泛,原理成熟,此处不再赘述。文献[15]给出了利用测量电阻及其变化率来检测振荡的判据,表示如下:

$$R + K \frac{dR}{dt} > A \quad (15)$$

其中, K 为预测系数; A 为整定值。该判据有一定的预测作用。

文献[6]给出了基于测量阻抗变化率 $\frac{dZ}{dt}$ 的判据。由推导关系式可知,在 $\delta = 180^\circ$ 时, $\frac{dZ}{dt}$ 最小,即:

$$\left| \frac{dZ}{dt} \right|_{\min} = \frac{Z}{4} \left| \frac{dZ}{dt} \right|_{\delta=\pi} \quad (16)$$

由现场的运行经验可知,系统振荡周期最大一般不会超过3s,所以有:

$$\left| \frac{dZ}{dt} \right|_{\delta=\pi} = \frac{2\pi}{T_s} \cdot \frac{2}{3} \pi \quad (17)$$

代入到式(16)中得到:

$$\left| \frac{dZ}{dt} \right| > \frac{\pi}{6} Z \quad (18)$$

最终的判断振荡表达式为:

$$\left| \frac{dZ}{dt} \right| > \frac{\pi}{6} Z \quad (19)$$

$$t > \Delta t \quad (20)$$

其中 Δt 为故障时保护的开放时间。

2.4 相角 θ 型解列判据

该类判据利用测量电压 U 和测量电流 I 之间的夹角 θ 与功角 δ 的关系来检测振荡。 θ 与 δ 的关系可以表示为:

$$\theta = \arctan \frac{\left(\frac{1}{2} + \frac{Z_{om}}{Z} \right)}{\left(\frac{1}{2} - \frac{Z_{om}}{Z} \right) + \left(\frac{1}{2} + \frac{Z_{om}}{Z} \right) \cos \delta} \quad (21)$$

其中, Z_{om} 为测量点到振荡中心的阻抗; Z 为系统总的等值阻抗。

$$\text{令: } m = \frac{\frac{1}{2} Z + Z_{om}}{\frac{1}{2} Z - Z_{om}} \quad (22)$$

$$\text{整理得: } \theta = \arctan \frac{m \sin \delta}{1 + m \cos \delta} \quad (23)$$

把表示 θ 角的四个象限分为六个区域,如图2所示:

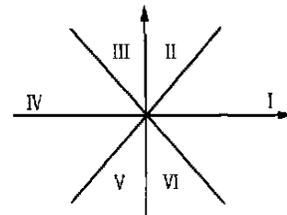


图2 θ 角分区示意图

Fig 2 Schematic diagram of partitioning angle θ

利用夹角 θ 检测系统振荡的原理如下:当振荡中心在正方向,正常运行在I区(送端)时,若有 θ 的变化轨迹为I- II- III- IV,认为经历了一个振荡周期;正常运行在IV区(受端)时,若有 θ 的变化轨迹为IV- III- II- I,也认为经历了一个振荡周期。当振荡中心在反方向,正常运行在I区(送端)时,若有 θ 的变化轨迹为I- VI- V- IV,认为经历了一个振荡周期;正常运行在IV区(受端)时,若有 θ 的变化轨迹为IV- V- VI- I,也认为经历了一个振荡周期。当振荡中心在装置安装处附近,测量电压 U 必须很低,正常运行在I区时, θ 的变化轨迹为I- IV- I,作为一个振荡周期;正常运行在IV区时, θ 的变化轨迹为IV- I- IV,作为一个振荡周期。

对该类判据的评价:

(a) 反映三相电流变化量的判据其动作特性独立于振荡中心的位置,有效的克服了负荷及运行方式造成的影响。但该判据不能反映电流的方向,

也不能反映电压、电流的相位关系,对振荡和摆动的判断受到限制。适合判断两系统联络线之间发生的振荡,在现场中有一定的应用。

(b) 反映瞬时振荡电流波形的判据灵敏度较高,能在最短的时间内分辨出振荡、故障和振荡中故障。但它受负荷和网络结构影响较大,亦不能区分振荡和摆动。该判据由于应用条件较为严格,所以不适合单独使用,可以作为辅助判据来使用。

(c) 反映振荡中心电压 U_z 的判据在振荡失步边缘区段灵敏度较高,加入变化率后有一定的预测作用,但 U_z 与 δ 的简单关系是在理想的条件下,做了一定的假设和大量的简化的基础上取得的,计算存在误差,这类判据在国外应用较为普遍,国内也有部分应用。

(d) 阻抗型判据能反映各种原因造成的振荡,在预测动态稳定性方面准确性较高,但它容易受系统运行方式和网络结构的变化影响。目前国内外大多数解列装置都是基于阻抗原理的,其应用最为广泛。

(e) 反映 U 、 I 夹角 θ 的判据较好的反映了振荡的规律,动作可靠,但对于大规模的复杂网络,当系统发生振荡时可能会改变潮流的方向,从而造成装置误动或拒动。南瑞公司生产的 U FV 系列装置就是基于该类原理的,在国内有较广泛的应用。

3 直接测量功角的解列判据

文献[3],[12],[13]提出了利用 GPS 时间信号进行同步相位测量的方法,原理示意图如图 3 所示。在线路两端的每个变电站均安装一个通过对同步采样信号进行计算来获得其幅值和相位信息的同步相量测量单元(PMU),并接收对侧同步相位测量值。计算两系统相量的相位差。若计算值超过了整定值,则发出跳闸允许命令。为了防止误操作,加入了辅助电流判据,即本文 3.1 中的判据,二者构成与门。当两判据同时满足时,与门给出跳闸信号。

另一种基于本地量直接计算功角 δ 的方法如图 4 所示:

设系统两端电势 $|E_M| = |E_N| = E$, 则线路压降表达式为:

$$E_M - E_N = I \cdot Z \quad (24)$$

其中, I 为系统振荡电流, Z 为系统阻抗。

根据余弦定理有:

$$E_{MN}^2 = E_M^2 + E_N^2 - 2E_M E_N \cos \delta \quad (25)$$

得到:

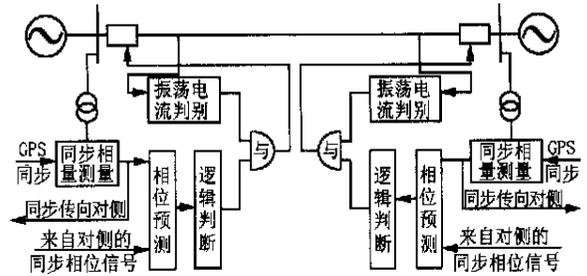


图 3 基于 GPS 系统的解列原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of network decoupling based on GPS system

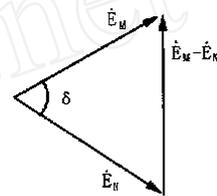


图 4 等值系统电势与线路压降

Fig. 4 the potential and circuit voltage drop of equivalent power system

$$\delta = \arccos \frac{2E^2 - E_{MN}^2}{2E^2} = \arccos \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{IZ}{E} \right)^2 \right] \quad (26)$$

若线路均匀, 振荡中心落在线路的中点, 此时有:

$$\sin \frac{\delta}{2} = \frac{IZ}{2E} \quad (27)$$

代入到式(21)有:

$$\delta = 2 \arcsin \frac{IZ}{2E} \quad (28)$$

实时计算 δ 值就可以检测系统的运行状况, 当得到的 δ 值大于设定的阈值时认为发生振荡, 为了增加其可靠性和预测力, 还可以引入 $d\delta/dt$, 与式(28)一起构成振荡检测判据。

文献[4]介绍了另一种直接得到 δ 的方法。相量关系如图 5 所示, E 为发电机电势, U 为无穷大母线电压。假设 v 是一个与 E 等速旋转的相量, 振荡时 v 与 E 的转速变为 $\omega_1 U$ 仍以 ω 旋转, 则在某一时刻 t 显然有:

$$\theta - \theta_0 = \delta - \delta_0 \quad (29)$$

其中 v 的获得可借助于发电机的测速装置实现, 原理如图 6 所示:

关于该类型判据的评价:

(a) 利用 GPS 技术和现代通讯技术研制基于同步相量测量技术的自适应解列装置是一个新的趋势, 可以达到较高的精度。但就目前而言, GPS 的普

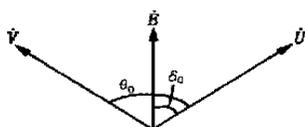


图5 正常情况下V、E、U相量图

Fig 5 Phasor diagram of V, E, U in normal state

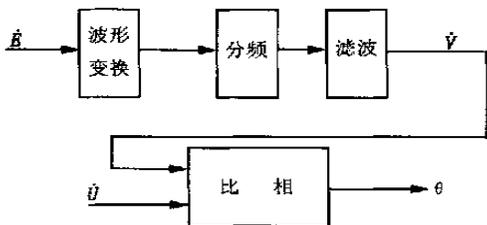


图6 功角测量框图

Fig 6 Block diagram of measuring power angle

及应用尚需时日,该装置的数据传输要借助于可靠高效的通讯手段,一旦通讯出现故障,整套装置将失灵。

(b) 基于本地量计算功角 δ 的判据原理简单,实现方便,但受负荷及网络结构影响较大,只能做粗略的计算,不能满足进一步的要求。

(c) 随着通讯技术的发展和相量测量手段可靠性的提高,利用全局信息进行系统稳定性的判断势在必行,尤其在复杂电力系统中可望获得广泛的应用。

4 反映能量原理的解列判据

利用振荡时有功功率是否过零点(即潮流方向是否改变)可清晰的区分非同步振荡和同步摆动[10],如图7所示。

设系统发生振荡或摆动时实测功率为 P_0 ,振荡之前负荷有功功率为 P_L ,引起的变化量为 ΔP ,则有:

$$\Delta P = P_0 - P_L \quad (30)$$

ΔP 的变化幅度(即 ΔP 的峰、谷差)反映了振荡或摆动的剧烈程度,动作判据为:

$$\Delta P_M > \Delta P_{set} \quad (31)$$

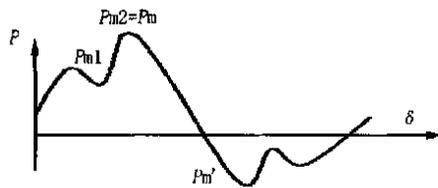
$$\Delta f > \Delta f_{set} \quad (32)$$

其中, ΔP_{set} 为有功功率变化量整定值; Δf_{set} 为振荡频率整定值。

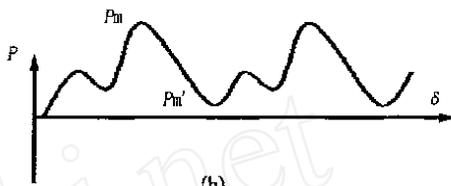
文献[5],[7]介绍了利用等面积准则法、李亚普诺夫直接法构成的判据,此处不再赘述。

对于这类判据的评价:

(a) 基于有功功率变化量的判据原理简单,可



(a)



(b)

图7 振荡(a)和摆动(b)时有功功率变化

Fig 7 Variation of active power during power swing (a) and oscillation (b)

较好的解决装置安装点距振荡中心较远时灵敏度不高的问题,适合安装在小电源与大系统的联络线上。它可以区分摆动与振荡,且动作特性不受运行方式和负荷的影响,但其对于送电侧和初始相角 δ_0 较小时的灵敏度不够。

(b) 基于等面积定则的判据有预测作用且预测速度快,理论上在故障的极限切除时刻就可做出预测。但该方法不能处理静态失稳的问题。当计及调速器、重合闸等作用时,用等面积定则来处理十分复杂。此外当送端系统较大,受端系统相对薄弱时,大扰动可能会使受端系统电压严重下降,此时用等面积定则来判断会产生较大误差。

5 电网振荡解列的发展趋势和方向

总结电网解列判据应注意的问题和振荡解列判据今后的发展趋势如下:

(a) 不同的情况下选择不同的判据,多种判据复用,互为补充。

目前还没有一种判据可以对系统的振荡做出全面的描述。系统从受到扰动,到摆动,再到失步振荡是一个复杂的过程,各种参数在不同的阶段呈现不同的特性,各种判据又各有利弊,因此应充分发挥各个判据的优点,尽量避免其缺点,多种判据复用,互为补充。此外,由于解列装置不要求瞬时出口,并有充足的时间进行计算,使得多判据复用成为可能。

(b) 在研究新型电网振荡解列判据时,应着重研究只与系统振荡程度相关,与正常负荷和运行方式无关,反映各电气量变化量(变化率)的判据,以求

获得更好的动作特性。

(c) 电网解列判据研究的发展趋势主要体现在基于本地量研究解列新算法, 利用 GPS 技术和现代通讯技术研究基于同步相量量测技术的自适应解列新算法以及利用人工智能研究新算法等。

随着计算机技术和现代通讯技术的发展, 柔性输电技术、人工智能控制和基于 GPS 的新一代动态安全监测系统已经成为现代电力系统中三项具有变革性影响的前沿课题。美、日、法等国家都在研制基于同步相量量测技术的失步解列装置, 这类装置具有预测作用和一定的自适应能力, 精度较高, 是今后一个新的发展方向。

人工智能的研究及其在电力系统中的应用越来越受到人们的重视, 其主要包括专家系统、遗传算法、神经网络、模糊集理论等内容。其中神经网络与模糊集理论的研究已经有了很大的进展。虽然目前多数研究只是停留在理论阶段, 但前景十分乐观。

(d) 目前讨论的大多数电网解列判据都是基于双机模型或者单机无穷大模型的。随着电力系统的发展, 电网互联已成趋势, 而且规模越来越大, 结构越来越复杂, 已经不能简单等值为双机和单机无穷大系统, 现有的判据亦不能满足其要求。在这种条件下应开展对大规模复杂电力系统的多机振荡模型的研究, 提出适合多机系统的振荡解列新判据。

6 结论

目前应用于电力系统的振荡解列装置利用各种电气量的变化规律, 从不同的角度反映了系统的振荡情况。在 GPS 等现代通信手段没有普及之前, 应大力开展基于本地量的振荡解列判据研究, 新型判据应不受负荷大小和运行方式的影响, 只与振荡程度相关。利用复合判据和基于各电气量的变化量(变化率)判据以求获得更好的动作特性。对于多机系统振荡原理目前尚未有充分的研究, 随着电力系统规模的扩大, 必须有针对多机电力系统的振荡解列判据。

参考文献

[1] 潘贞存, 桑在中, 戴方涛, 等. 电网解列的新判据[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(7).

- [2] 孔繁鹏, 葛耀中, 周秦武. 一种区分振荡与故障的新方法[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(4).
- [3] 陈青, 潘贞存, 王慧, 等. 失步预测算法研究[J]. 电力自动化设备, 1997, (8).
- [4] 李鹏, 陆于平, 高有权. 大型发电机微机失步保护的研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(22).
- [5] 王增平, 高中德, 毕天姝, 等. 基于能量原理的新型发电机失步预测及失步保护的研究[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(11).
- [6] 金华烽, 何奔腾. 电力系统振荡闭锁判别方法的研究[J]. 继电器, 1999, 27(2).
- [7] 张毅刚, 张保会. 大型发电机组失步预测及保护综述[J]. 继电器, 1999, 27(4).
- [8] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 中国电力出版社, 1995.
- [9] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 中国电力出版社, 1996.
- [10] 张荣. 电力系统自动解列装置的研究[D]. 山东工业大学硕士学位论文, 1999, 12.
- [11] 王梅义, 蒙定中, 吴竟昌. 大电网系统技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [12] Phadke A G, et al. Synchronized Sampling and Phasor Measurements for Relaying and Control[J]. IEEE Transactions of Power Delivery, 1994, 9(1).
- [13] Ohura Y. A predictive Out-of-step Protection System Based on Observation of the Phase Difference Between Substations[J]. IEEE Trans On Power Delivery, 1990, 5(4).
- [14] C W Taylor, J M Haner etc. A New Out-Of-Step Relay With The Rate Of Resistance Augmentation[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and system, 1983, PA S-102(3).
- [15] J M Haner, T D Laughlin, C W Taylor. Experience With the R-Rdot Out-Of-Step Relay[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, PWRD-1(2).

收稿日期: 2002-12-23; 修回日期: 2003-03-25

作者简介:

丛伟(1978-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护和紧急控制;

潘贞存(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、配网自动化和电能质量分析等;

肖静(1978-), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网自动化及其故障检测;

The study and analysis of power swing and grid splitting

CONG Wei, PAN Zhen-cun, XIAO Jing, ZHANG Rong

(下转第 69 页)

$K=1$ 为基波的情况, 基波的实部 虚部系数为:

$$U_R = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_n \cos n \frac{2\pi}{N} \quad (4)$$

$$U_I = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_n \sin n \frac{2\pi}{N} \quad (5)$$

则有

$$U_m^2 = U_R^2 + U_I^2 \quad (6)$$

将式中 u_n 代以电流采样值 i_n , 即可得

$$I_m^2 = I_R^2 + I_I^2 \quad (7)$$

6 结论

现场总线技术的出现, 使计算机控制系统真正实现了全分布式发展。新型自动化控制系统 FCS 的出现, 是信息技术在自动化领域的体现, 现场总线和嵌入式技术在变电站综合自动化领域的应用, 也必将越来越广泛。

参考文献:

- [1] 邬宽明 CAN 总线原理和应用系统设计[M], 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000
- [2] 唐涛 国内外变电站无人值班与综合自动化技术发展综述[J] 电力系统自动化, 1995, 19(10).
- [3] 纪建伟, 等. 电力系统分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002
- [4] 邵贝贝 $\mu C/O S$ - II 源码公开的实时嵌入式操作系统[M] 北京: 中国电力出版社, 2001.

收稿日期: 2003-05-12 修回日期: 2003- 07- 25

作者简介:

丁恩杰(1962-), 男, 博士, 副教授, 主要从事智能仪器仪表、监测监控系统方面的研究;

孙彦景(1978-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事嵌入式操作系统方面的研究。

The Design of Protection and Control Device Based on Field Bus

Ding En- jie, Sun Yan- Jing

(China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract This paper gives a new type of protection and control device based on field bus and embedded system. It also gives the hardware, software and protection algorithm of the device in detail

Key words: field bus; micro- processor based protection; control system; protection algorithm

(上接第 55 页)

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan, 250061)

Abstract The changing characteristics of every electric quantity during power swing are analyzed. Some different kinds of grid splitting criteria that based on these variables are introduced. They are classified to three kinds: measuring the power angle indirectly, measuring the power angle directly and measuring the active power. The characteristics and application scope of every criterion are analyzed in-depth, on the base of which, some kinds of criteria are improved, and a new grid splitting method based on the variation of active power are introduced. At the end of this paper, for the large and complicated power system, some points for attention and new trends of development are indicated when we design new grid splitting criteria.

Key words: power system swing; grid splitting; phase angle measurement

许继集团“校准实验室”通过国家认可委认可

由集团公司计量中心、电测室组建的“仪器仪表校准实验室”经过近一年的准备和试运行后, 迎来了国家认可委员会的正式评审。

8月29日-31日受国家认可委员会的委托, 由国家级评审专家组成的评审小组一行四人, 到我公司“仪器仪表校准实验室”进行了为期三天的现场评审。专家组通过现场抽样、观察、取证、实际操作、提问、查看资料认为: 本“仪器仪表校准实验室”所建立的质量管理体系符合 ISO/IEC 17025-1999 检测和校准实验室能力的通用要求及 CNAL/AC01: 2002 实验室认可准则的要求, 各项基础工作扎实认真, 人员技术能力和管理水平较高, 体系运行持续有效, 批准通过“国家认可委员会”的认证, 并承报“国家认可委员会”发证。