

基于 PMU 的预测型振荡解列初步研究

周良松, 夏成军, 彭波, 胡会骏

(华中理工大学电力工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出了基于同步相量测量单元的预测型振荡解列方法。振荡中心两侧母线电压的相角差反映了功角差, 利用该相角差的变化速度及符号, 可以判定是同步振荡还是异步振荡以及滑差的情况, 并实现预测解列功能。重点分析了相角差与功角差的关系。

关键词: 同步相量测量单元; 同步振荡; 异步振荡; 解列

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)03-0009-04

1 概述

所有国内外重大系统事故的发生, 几乎都是因系统失稳而扩大, 因无预定对策, 发展为灾害性后果的。长期的运行实践证明, 不管对系统稳定性的要求如何严格, 措施如何完善, 总可能因一些事先不可预料的偶然因素叠加, 产生稳定破坏事故, 如果处理不好, 其后果是电力系统的长期大面积停电^[1]。通常将“失步解列”控制作为稳定控制的后备, 是减轻失步造成的后果和防止系统大面积停电的重要措施^[2]。

GPS(全球定位系统)是迄今为止传播范围最广、精度最高的无线电时钟信号资源, 利用 GPS 的高精度对时功能开发的同步相量测量单元(PMU)能够提供电力系统节点电压相量的直接测量。美国、法国等都相继研制了基于 GPS 技术的电压相量测量装置, 并开展了基于电压相量的电力系统的监视、保护和稳定控制的理论和应用研究工作^[3~5]。国内在这方面也作了很多研究^[6~8]。文献^[5]对用相对相角信息进行切机控制作了可行性研究, 表明使用相对相角信息可以识别区域间的暂态稳定性, 并且提高切机控制的选择性。文献^[6]针对全国互联电网步伐的加快, 全国大电网的稳定监视和控制越来越重要, 提出了一种基于 PMU 的全国互联电网的分层稳定监控系统。

但是, PMU 用于电力系统实时暂态稳定分析与控制中还存在困难, 主要是通信延时问题。BPA 的通信工程师的测试表明, 在 Colstrip 和 Coulee 之间的通信延时为 4 个周波^[5], 国内外有关文献表明, PMU 的通信延时在 5 个周波左右。因此, 相角信息用于监视系统的动态行为是可行的, 但要用于电力系统实时暂态稳定分析与控制中, 还有待技术水平的提高。由于一般情况下系统允许作短时间的异

步运行, 因此利用同步相量测量信息于系统的解列控制具有实际的可行性。

利用振荡中心两侧母线电压相量的相角差检测异步运行状态, 必须了解相角差是如何反映发电机的稳定运行状态, 即发电机的相对功角。本文详细分析了不同情况下相角差与功角差之间的关系, 指出了在实际应用中应注意的问题。

2 相角差为依据的预测振荡解列原理分析

失步断面两侧发电机的功角差直接反映了系统稳定与否, 利用功角差及其变化率可以判断系统的异步运行状态。但是, 目前直接测量发电机功角还很难实现或者实现起来很复杂, 而利用同步相量测量装置测量振荡中心两侧母线电压相角则是方便易行的。下面分析如何利用相角差来反映功角变化。

电力系统失步时, 一般可以将所有机组分为两个机群, 用两机等值系统分析其特性。如图 1 所示两机等值系统接线图。

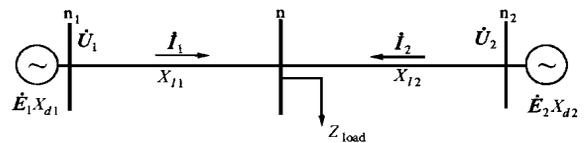


图1 两机等值系统接线图

在分析中采用简化条件, 即:

发电机采用经典模型。

在频率的实际变化范围内, 认为阻抗值不变。

线路中间负荷用恒定阻抗模型。

线路阻抗全线均匀分布, 并忽略分布电容和线路电阻。

图 1 中 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 、 jX_{d1} 、 jX_{d2} 分别为 n_1 侧、 n_2 侧等值发电机的暂态电势和暂态电抗。设以 \dot{E}_2 为参考相量, 使其相位角为 0, 取 $\dot{E}_2 = 1$, 认为 n_1 侧系统等

值电势 \dot{E}_1 围绕 \dot{E}_2 旋转或摆动, 即 $\dot{E}_1 = k_e e^{j\delta}$, (k_e 为电势幅值比, 为发电机 E_1 相对于发电机 E_2 的功角)。

下面分两种情况讨论: 无中间负荷分支情况和有中间负荷分支情况。

2.1 无分支情况

在不考虑中间负荷分支情况下, 图 1 可简化为如图 2 形式。

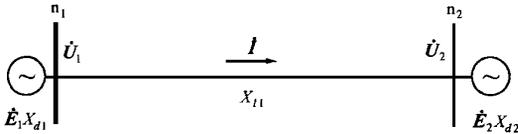


图 2 无分支系统接线图

在简化条件下, 可求得电流相量如下:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{j(X_{d1} + X_l + X_{d2})} = \frac{k_e e^{j\delta} - 1}{j(X_{d1} + X_l + X_{d2})}$$

n_1 和 n_2 侧母线电压相量分别为:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 - jX_{d1} * \dot{I}, \quad \dot{U}_2 = \dot{E}_2 + jX_{d2} * \dot{I}$$

由此得到两侧母线电压相角差为:

$$\delta = \angle \dot{U}_1 / \dot{U}_2$$

当网络结构一定时, δ 、 \dot{U}_1 、 \dot{U}_2 是和参数 k_e 的函数, 因而 δ 是和参数 k_e 的函数, 记为 $\delta = f(k_e)$ 。对于给定的 $k_e = 1.0$, 可以得到 $\delta \sim \delta$ 曲线如图 3 所示。

由该曲线可以得到以下结论:

1. δ 是 k_e 的周期函数, 在一个周期 $[-\pi, +\pi]$ 内,

(1) δ 与 k_e 是单值映射, 且随 k_e 的增加而单调增加。

(2) 由 $d\delta/dk_e = \frac{d\delta/dt}{dk_e/dt} > 0$, 可知, δ 的变化率和 k_e 的变化率(即滑差)同号。

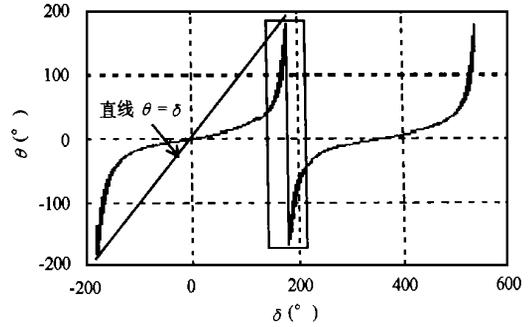
(3) 在 $\delta = \pm \pi$ 时, 会有一个较大的突变, 且其符号也改变。

(4) δ 与 k_e 之间是一非线性关系, 不能简单地用 $\delta = k_e$ 替代。尤其要注意 δ 的跃变情况。

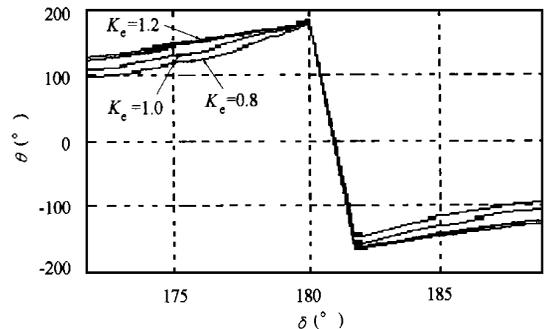
改变参数 k_e 的取值, 可以得到相角差和功角差(即 $\delta \sim \delta$) 的一簇曲线。仿真得到的曲线如图 3(a), 矩形框中局部放大图如图 3(b)。由图可知, k_e 在一定范围内取值(此时振荡中心在母线 n_1 与 n_2 之间)时, 不会改变 $\delta \sim \delta$ 曲线的拓扑性质; 当 k_e 增大时, $\delta \sim \delta$ 曲线和直线 $\delta = k_e$ 更加贴近。

2.2 有分支情况

当有中间分支负荷时, 除要考虑电势幅值比 k_e



(a) K_e 取值对 $\theta \sim \delta$ 的影响



(b) 局部放大图

图 3

的不同取值, 还要考虑负荷在不同位置和负荷大小的变化对于 $\delta \sim \delta$ 的影响。为此, 设线路的总阻抗为 X_l , $X_{l1} = k_{line} * X_l$, $X_{l2} = (1 - k_{line}) * X_l$, $Z_{load} = Z_{load}^{(0)} * k_{load}$ 。其中 $Z_{load}^{(0)} = 0.2675 + j0.1605$, $0 < k_{line}$

< 1 , $k_{load} > 0$ 。可以得到以下关系式:

$$X_1 = X_{d1} + X_{l1}, \quad X_2 = X_{d2} + X_{l2}$$

$$\dot{I}_{load} = \frac{(\dot{E}_1 / jX_1 + \dot{E}_2 / jX_2) * (jX_1 // jX_2)}{jX_1 // jX_2 + Z_{load}}$$

$$\dot{U}_n = \dot{I}_{load} * Z_{load}$$

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 - jX_{d1} * \frac{\dot{E}_1 - \dot{U}_n}{jX_1}$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - jX_2 * \frac{\dot{E}_2 - \dot{U}_n}{jX_2}$$

$$\delta = \angle \dot{U}_1 / \dot{U}_2$$

则 δ 是和参数 k_e 、 k_{line} 、 k_{load} 的函数, 记为 $\delta = f(k_e, k_{line}, k_{load})$ 。下面分析参数的不同取值对 $\delta \sim \delta$ 曲线的影响。

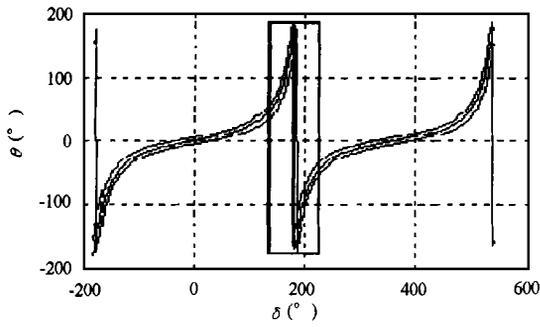
(1) 负荷位置 (k_{line}) 的影响

令 $k_{load} = 1.0$, $k_e = 1.0$, k_{line} 分别取 1.0、0.5、0, 得到 $\delta \sim \delta$ 曲线如图 4。

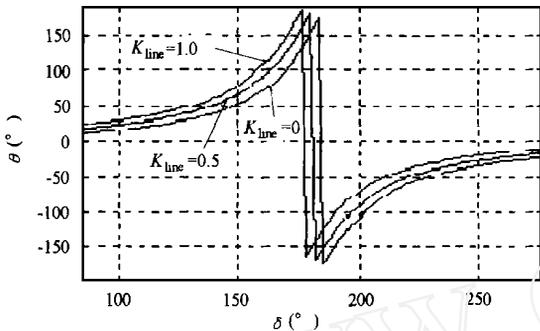
k_{line} 取较大值时, $\delta \sim \delta$ 曲线沿着 δ 轴向右平移。

(2) 负荷大小 (k_{load}) 的影响

令 $k_{line} = 0.5$, $k_e = 1.0$, k_{load} 分别取 0、1.0、, 得



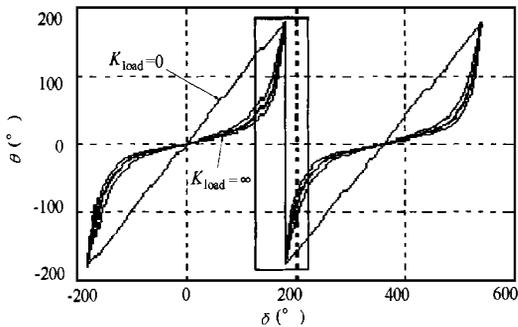
(a) K_{line} 对 $\theta \sim \delta$ 的影响



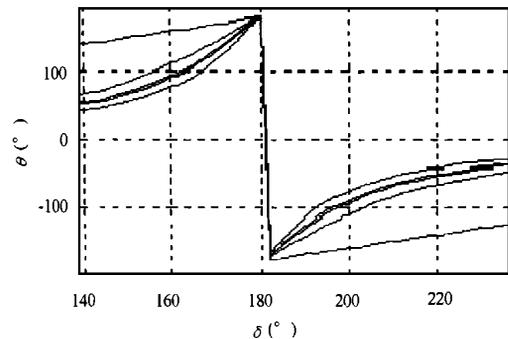
(b) 局部放大图

图4

到 \sim 曲线如图5。



(a) K_{load} 对 $\theta \sim \delta$ 的影响



(b) 局部放大图

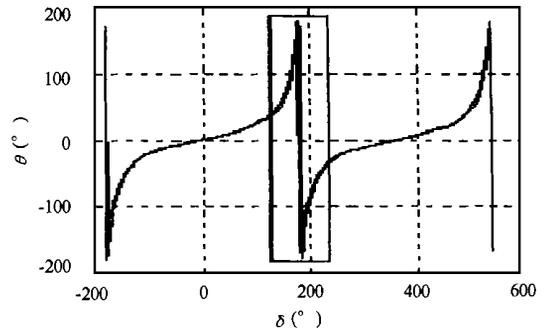
图5

考虑两种极端的情况： $k_{load} = 0$ 或 $k_{load} = \infty$ 。当 $k_{load} = 0$ 时，相当于在该处发生持续三相短路故障，

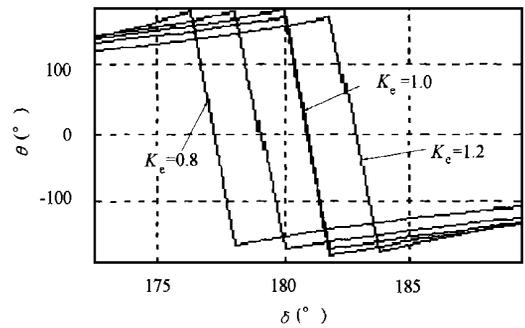
此时计算得到的曲线是一条直线。当 $k_{load} = \infty$ 时，则与该负荷分支情况一样。当 k_{load} 取其他值时，得到的 $\theta \sim \delta$ 曲线夹在上述两曲线之间。

(3) 电势幅值比 (k_e) 的影响

令 $k_{load} = 1.0, k_{line} = 0.5, k_e$ 分别取 0.8、1.0、1.2，得到 $\theta \sim \delta$ 曲线如图6。



(a) K_e 取值对 $\theta \sim \delta$ 的影响



(b) 局部放大图

图6

k_e 取较大值时， $\theta \sim \delta$ 曲线沿着 δ 轴向右平移。

3 讨论

以上给出的仿真曲线是针对振荡中心在两侧母线范围内的情况。事实上，振荡中心会随着运行方式、网络结构的不同而变化。振荡中心的偏移对于观测点的选择、整定值的设定有着重要影响。仿真计算发现，参数 k_e 的不同取值影响振荡中心的位置。当网络结构一定、且选定观测点为两侧母线时，若参数 k_e 超过一定范围，振荡中心会偏移至观测点之外。以下对无负荷分支情况(图2)进行分析。

由假设条件知：线路阻抗角和系统阻抗角相等，均为 90° 。可画出电压相量图^[9]如图7所示。

由图7易知，Z 为功角为 θ 时的振荡中心，不难推导出

$$\frac{AZ}{AB} = \frac{k_e + k_e \cos \theta}{k_e^2 - 2k_e \cos \theta + 1}$$

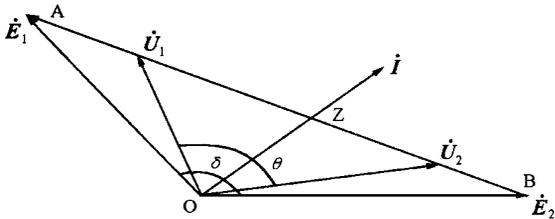


图 7 电压相量图

当 $\frac{AZ}{AB} \frac{X_{d1} + X_l}{X_{d1} + X_l + X_{d2}}$ 或 $\frac{AZ}{AB} \frac{X_{d1}}{X_{d1} + X_l + X_{d2}}$ 时, 振荡中心落在母线 n_1 与 n_2 之外。即:

$$\frac{k_e + k_e - \cos \theta}{k_e^2 - 2k_e \cos \theta + 1} \frac{X_{d1} + X_l}{X_{d1} + X_l + X_{d2}}$$

$$\text{或} \frac{k_e + k_e - \cos \theta}{k_e^2 - 2k_e \cos \theta + 1} \frac{X_{d1}}{X_{d1} + X_l + X_{d2}} \quad (*)$$

对于本文采用的算例,当 $k_e = 1.3245$ 或 $k_e = 0.7550$ 时, (*) 式对于所有的 θ 均成立(即振荡中心不在两侧母线范围内)。下面给出 $k_e = 1.4$ 和 $k_e = 1.6$ 时的 $\delta - \theta$ 曲线。

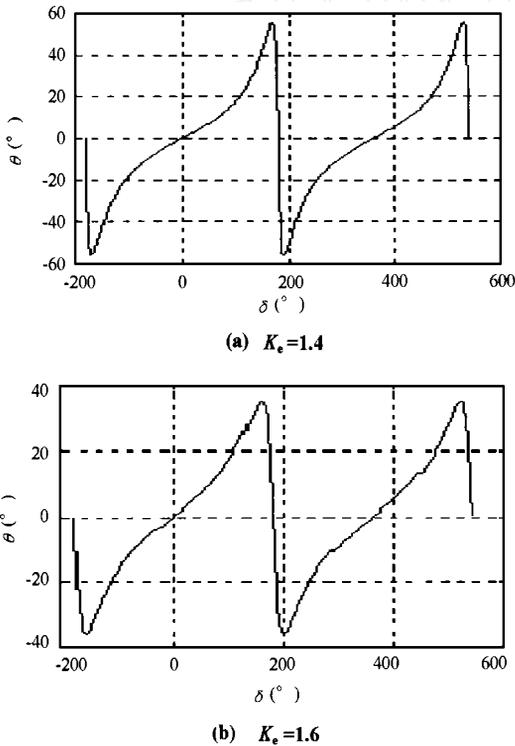


图 8 振荡中心不在两侧母线范围内 $\delta - \theta$ 曲线

由图 8 可知,此时 $\delta - \theta$ 曲线发生了重要变化: 在一个周期 $[-\pi, +\pi]$ 内变化时, 始终在一定的幅值范围内波动,不可能达到 $\pm 90^\circ$;且当 $\theta = \pm 90^\circ$ 时, $\delta = 0^\circ$;在 $k_e > 1.3245$ 时,随着 k_e 的变大, 波动的幅值变小;在 $k_e < 0.7550$ 时,随着 k_e 的变小, 波动的幅值变小。

综合以上分析:当振荡中心在观测点范围之外, $\delta - \theta$ 曲线的性质发生了重要变化,在确定观测点和设定解列装置整定值时要充分考虑到这一点。

4 结论

母线电压相角差可以反映两侧发电机组的功角差,但相角差与功角差之间的关系受到多种因素的影响。当振荡中心位于母线 n_1 与 n_2 之间时,这些影响不会改变 $\delta - \theta$ 曲线的拓扑性质,因此可以由相角差检测系统是否失步。利用该相角差可以判定系统是同步振荡还是异步运行,由预测方法还可以在系统失步之前即实施解列控制,加快控制速度。但当振荡中心位于母线两侧时, $\delta - \theta$ 曲线的性质发生了重要变化,在实际应用中要充分考虑到这一点。

参考文献:

- [1] 王梅义,吴竟昌,蒙定中. 大电网系统技术. 北京:水利电力出版社,1991.
- [2] 袁季修. 电力系统安全稳定控制. 北京:中国电力出版社,1996.
- [3] Burnett R O. Synchronized Phasor Measurements of a Power System Event. IEEE Trans on Power System, 1994, 9(3).
- [4] Romyak S et al. Predicting Future Behaviour of Transient Events Rapidly Enough to Evaluate Remedial Control Options in Real-time. IEEE Trans on Power System, 1995, 10(3).
- [5] Kosterev D N, Esztergalyos J, Stigers C A. Feasibility Study of Using Synchronized Phasor Measurements for Generator Dropping Controls in the Colstrip System. IEEE Trans on Power System, 1998, 13(3): 755 ~ 761.
- [6] 卢志刚,郝玉山,等. 电力系统实时相角监控系统结构研究. 电网技术, 1998, 22(5).
- [7] 闵勇,丁仁杰,韩英铎,等. 一次系统事故的同步相量测量结果分析. 电力系统自动化, 1998, 22(7).
- [8] 高厚磊,贺家李. 基于 GPS 的同步采样及在保护与控制中的应用. 电网技术, 1995, 19(7).
- [9] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理(第三版). 北京:水利电力出版社,1994.

收稿日期: 2000-08-14

作者简介: 周良松(1967 -),男,博士,副教授,主要研究方向为电力系统稳定与控制; 夏成军(1974 -),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制; 彭波(1975 -),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制及管理信息系统。

大波动地区级系统短期负荷预测方法研究

丁智华,金海峰,吴耀武,熊信良

(华中科技大学电力系,湖北 武汉 430074)

摘要: 提出了针对容量较小、负荷波动较大的地区级电力系统适用的短期负荷预测方法,共分为四个步骤:原始数据的预处理,用模糊系统预测预测日的峰谷值,用人工神经网络预测预测日的24h负荷值,根据第一步的结果用专家系统决定最终的负荷预测值。利用本文提出的方法对福建永安电力系统1999年1月至2000年6月的数据进行预测,结果证明了方法的快速性和准确性。

关键词: 地区级电力系统; 模糊系统; 人工神经网络; 专家系统; 短期负荷预测

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)03-0013-03

1 引言

电力系统负荷预测特别是短期负荷预测对电力系统经济运行,电网负荷的监控和管理以及对发、供电计划的编排都有极为重要的意义。一句话,电力系统的安全、可靠、经济运行离不开运作良好的短期负荷预测方法和相应的软件。

目前,电力系统短期负荷预测方法主要可分为两类:一类是传统的预测方法,如回归法、指数平滑法等;另一类是所谓的人工智能法,如人工神经网络法、模糊系统法、专家系统法等,每类方法都有其优越性和适用环境,离开了具体的电力系统,评价任何一种方法都失去了检验的标准,没有什么意义可言。

本文所阐述的方法是基于地区电力系统的短期负荷预测的方法。

地区电力系统通常是一个容量较小、波动较大的电力系统,有大电网和系统本身两个电源供电。负荷关系如下:

系统负荷 = 网供负荷 + 系统内发电负荷

对于地区电力系统而言,运行调度人员所关心的是网供负荷的大小,因为它与经济性的关系最为密切,这也是本文所讲的负荷预测目标为网供负荷

值的原因所在。除此之外,地区电力系统又有其特殊性,以某地区系统为例,其电力系统运行的特点如下:

1) 系统容量较小,历史数据表明,系统平均负荷水平为90MW,最大负荷不超过150MW,考虑到负荷的增长因素,预计2002年最大负荷也不会超过200MW;

2) 该系统中有几个主要负荷容量相对较大,如容量最大的两个负荷化纤厂和福州水泥厂分别占系统总容量的30%和10%,这两个负荷的正常工作与否对系统影响极大,系统日平均负荷最大为120MW,最小则为56MW,波动非常大;

3) 该系统是一个水火电并容的系统,当地一日多变的气象条件对小水电影响很大,从而影响网供负荷值;

4) 以上这些特点导致该系统网供负荷波动性很大,历史资料表明,相邻两天的平均负荷最大波动高达50%,同一天中相邻点的负荷最大波动高达17%,与一般的电力系统负荷预测相比,地区电力系统的这些特点给预测工作带来了巨大的困难。

基于短期负荷预测的特点和所预测系统的特殊情况基本否认了传统的预测方法,因此本文力求运

Study on predictive system separation controls based on PMU

ZHOU Liang-song, XIA Cheng-jun, PENG Bo, HU Hui-jun

(Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper proposes a predictive method for system separation control based on synchronized phasor measurements. The relative phase angles of the buses voltage reflect the change of relative power angles, so whether the system is in synchronous oscillation condition or in asynchronous oscillation condition can be identified and predictive system separation control can be applied, by the change speed and sign of relative phase angles. The main purpose of this paper is to analyze the relationship between relative phase angles and relative power angles.

Key words: synchronized phasor measurements; synchronous oscillation; asynchronous oscillation; system separation