

基于相位角原理的失步振荡解列判据机理研究

董希建¹, 赵杰², 凌超¹, 李雪明¹, 李惠军¹, 张正勤¹, 张长银¹

(1. 国网电力科学研究院, 江苏 南京 210003; 2. 甘肃电力调度通信中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 就双机等值系统在失步振荡过程中的电压、电流和相位角等电气量进行理论分析和计算, 总结出它们尤其是相位角在失步过程中的变化规律; 考虑实际运行情况, 进一步探讨基于相位角原理的判据在装置上实现时应该注意的问题, 指出失步解列装置应能正确区分失步振荡、同步振荡和故障; 通过增加启动判据来实现加速启动等辅助条件, 进一步补充、完善相位角原理判据, 使判据具有先进性和普遍适用性。

关键词: 失步; 同步; 相位角原理; 启动

Research on out-of-step oscillation criterion mechanism based on principle of phase angle

DONG Xi-jian¹, ZHAO Jie², LING Chao¹, LI Xue-ming¹, LI Hui-jun¹, ZHANG Zheng-qin¹, ZHANG Chang-yin¹

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. Gansu Electric Power Dispatching and Communication Center, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In this paper, the voltage, current and phase angle in the process of out-of-step based on the two-machine equivalent system are analyzed and calculated. Some rules, especially the phase angle's changing rule in the process, are summed up. Take into account the actual operation, the criterion based on phase angle principle is further explored in order to be better used to equipments. A viewpoint that out-of-step splitting device should correctly distinguish out-of-step oscillation, synchronous oscillation and fault is put forward. Some start criteria are added in order to accelerate the start speed, to improve the phase angle criterion and make the criterion have advanced capability and universal applicability.

Key words: out-of-step; synchronous oscillation; principle of phase angle; start

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)07-0001-06

0 引言

电力系统当发生严重故障造成功角稳定破坏时, 稳定破坏后的失步状态可能在系统中引起电流和功率的严重振荡, 给电力设备造成巨大冲击, 甚至引起大范围停电事故。因此, 我国《电力系统安全稳定导则》明确规定^[1]: 运行中的电力系统必须在适当的地点设置解列点, 并装设自动解列装置。当系统发生稳定破坏时, 能够有计划地将系统迅速而合理地解列为供需尽可能平衡而各自保持同步运行的两个或几个部分, 防止系统长时间不能拉入同步或造成系统频率和电压崩溃, 扩大事故。失步解列装置作为电网安全稳定控制第三道防线的重要设备, 在电力系统运行中发挥重要作用。

1 两机简单系统失步状态行为

电力系统失步时, 一般可将所有机组分为两个

同调机群, 用两机等值系统分析其特性, 一方面, 为了分析简单; 另一方面, 电力系统在失步初期送端电网的机组具有同调特性, 受端电网的机组也具有同调特性^[2-3]。

1.1 等值系统

考虑图1所示的两机等值系统, 为分析方便, 采用下列假设条件:

(1) 两等值机电动势分别为 \vec{E}_1 和 \vec{E}_2 , 考虑自动励磁调节及凸极效应, 电动势变化范围为 0.9~1.1 额定值;

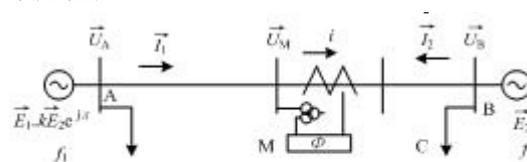


图1 两机等值系统接线图

Fig.1 Wiring diagram of equivalent two-machine system

(2) 假定输电线路全线是均匀的, 即等值阻抗 \vec{Z}_{eq} 的阻抗角 Φ_{eq} 全线相同; 认为在频率的实际变化范围内, 认为 Z_{eq} 值恒定不变;

(3) 输电线路全线长度为1, 装置安装处 (\vec{U}_M) 到 \vec{E}_1 的距离为 k_v 。

1.2 系统失步状态时的电流行为

利用叠加原理, 由图1, 可得失步状态下电流相量 (以相量 \vec{E}_2 为基准) 为:

$$\vec{I}_1 = \frac{\vec{E}_1 - \vec{E}_2}{\vec{Z}_{eq}} = \frac{\vec{E}_2}{\vec{Z}_{eq}} \times (ke^{j\delta} - 1)$$

式中: $k = E_1 / E_2$, δ 为 \vec{E}_1 与 \vec{E}_2 之间夹角。从而有:

$$I = \sqrt{1 - 2k \cos \delta + k^2} \left| \frac{E_2}{Z_{eq}} \right|$$

显然, 一个异步状态周期中电流的变化如图2所示。

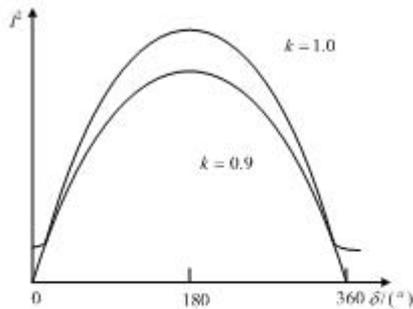


图2 失步状态下电流变化图

Fig.2 The changing of current under out-of-step

可见, 当两侧电动势的夹角 $\delta = 180^\circ$ 时, 电流最大; $\delta = 0^\circ$ 时, 电流最小; 如果两侧电动势幅值相等, 即 $k = 1$, 则 $\delta = 0^\circ$ 时电流为零。

1.3 系统失步状态时的电压行为

在失步过程中, 装置安装处的电压 (\vec{U}_M) 的有效值总是在不断变化的, 如图3所示。

图3中: U_{MIN} 为变化过程中的最低值, 我们推导 U_{MIN} , 列出方程式:

$$\vec{E}_1 - \vec{E}_2 = \vec{I} \vec{Z}_{eq}, \quad \vec{E}_1 - \vec{U}_M = k_v \vec{I} \vec{Z}_{eq}$$

在设 $\vec{E}_1 = ke^{j\delta} \vec{E}_2$ 的前提下, 有:

$$\vec{U}_M = \vec{E}_1 - k_v \vec{I} \vec{Z}_{eq} = [(1 - k_v)ke^{j\delta} + k_v] \vec{E}_2$$

$$|\vec{U}_M| = \sqrt{(1 - k_v)^2 k^2 + k_v^2 + 2k_v(1 - k_v)k \cos \delta} |\vec{E}_2|$$

显然, 当装置安装位置已定, 在 $\cos \delta = -1$ 即

$\delta = 180^\circ$ 时, 装置安装点电压的有效值 $|\vec{U}_M|$ 达到最小值。此时, \vec{E}_1 、 \vec{E}_2 及 \vec{U}_M 的相量位置如图4所示。

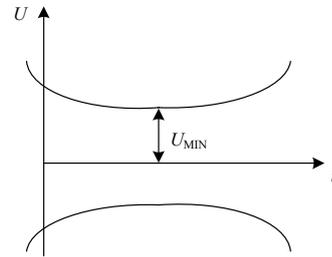


图3 失步状态时装置安装处电压的变化情况

Fig.3 The voltage at the position where the equipment is installed

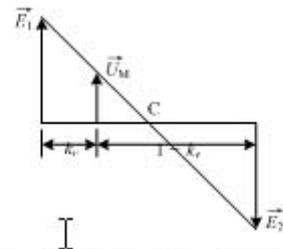


图4 U_{MIN} 达到最小值时的相量图

Fig.4 The vector map when U_{MIN} achieves the minimum

由简单的比例关系可以得到: $|\vec{U}_M| = |\vec{E}_1| - k_v (|\vec{E}_1| + |\vec{E}_2|)$ 。可以得出, 如果两侧电动势幅值相等并且装置安装在输电线路的中点时, 装置安装处的线路电压为零。

推导 U_{MIN} 的目的是将其作为解列动作区范围的判据。如果 $U_{MIN} \geq ULS^*$ (失步振荡解列动作区范围低电压定值), 则装置偏离振荡中心过远, 不再进行失步判断, 反之则进行判断。这样, 通过改变振荡周期计数和振荡包络电压的整定值, 可以实现同网相邻装置解列点的协调配合, 保证电网只在一个失步断面上进行解列。

1.4 系统失步状态时的相位角行为

推导相位角变化规律之前, 先定义几个概念: 正、反方向; 振荡中心; 送、受端。

1.4.1 振荡中心

我们把异步状态下, 电压最低的那一点叫做振荡中心。本文只探讨振荡中心落在本线路上的情况。

1.4.2 正、反方向

所谓正、反方向是指振荡中心相对于装置安装处的落点。在图1中, 以A为基准, 当 $|AM| < |AC|$ 时, 称振荡中心落在装置安装处的正方向; 当

$|\Delta M| > |\Delta C|$ 时, 称振荡中心落在装置安装处的反方向; 而当 $|\Delta M| \approx |\Delta C|$ 时, 称振荡中心落在装置安装处附近。

1.4.3 送、受端

当有功由 M 点支援 C 点 (振荡中心), 如图 5 和图 6 所示的情况, 则称 M 点处于送端; 反之, 则称 M 点处于受端, 如图 7 和图 8 所示的情况。

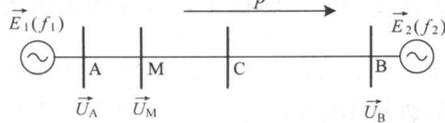


图 5 振荡中心落在装置安装处的正方向
且 M 点处于送端位置

Fig.5 Oscillation center is in the positive direction
and the M is at the sending area

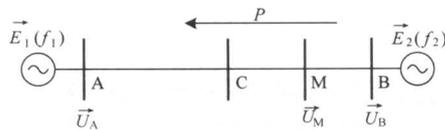


图 6 振荡中心落在装置安装处的反方向
且 M 点处于送端位置

Fig.6 Oscillation center is in the opposite direction
and the M is at the sending area

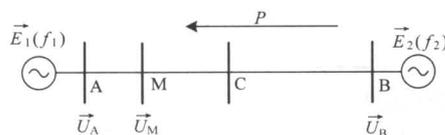


图 7 振荡中心落在装置安装处的正方向
且 M 点处于受端位置

Fig. 7 Oscillation center is in the positive direction
and the M is at the receiving area

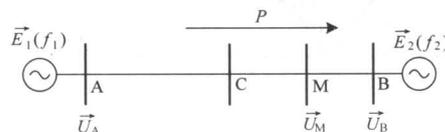


图 8 振荡中心落在装置安装处的反方向
且 M 点处于受端位置

Fig.8 Oscillation center is in the opposite direction
and the M is at the receiving area

明确正、反方向和送、受端的概念后, 便可以根据失步振荡过程中可能发生的实际情况, 分五种情况对相位角行为进行分析, 探索其在失步振荡过程中的变化规律。

1.4.4 相位角行为

1) 正方向、送端

该状态对应图 5, 此时潮流由 \vec{E}_1 沿着线路流向 \vec{E}_2 。由于潮流方向为有功功率的流向, 而频率反映了有功功率的大小, 可以直观地认为 \vec{E}_1 的频率 f_1 大于 \vec{E}_2 的频率 f_2 , 即 $f_1 > f_2$, 二者之间就有了相对运动, 引起 δ 的大小变化, 进而引起 φ (线路的相位角, 即电压与电流的夹角) 变化。图 9 中示出失步过程中 \vec{E}_1 、 \vec{E}_2 、 \vec{U}_M 和 \vec{U}_C 的向量位置, 视 \vec{E}_2 不动, 而 \vec{E}_1 超前 \vec{E}_2 做逆时针旋转, 周期为 $T = 1/|f_1 - f_2|$ 。

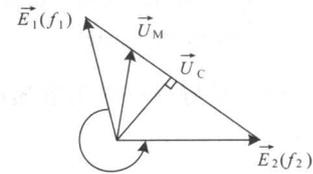


图 9 正方向、送端时的相量图

Fig.9 The vector map at the condition of positive direction
and sending area

2) 正方向、受端

该状态对应图 6, 此时潮流由 \vec{E}_2 沿着线路流向 \vec{E}_1 , 而 $f_1 < f_2$ 。图 10 中示出失步过程中 \vec{E}_1 、 \vec{E}_2 、 \vec{U}_M 和 \vec{U}_C 的向量位置。

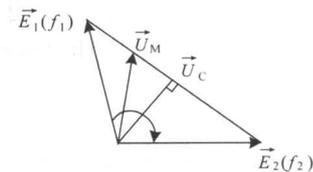


图 10 正方向、受端时的相量图

Fig. 10 The vector map at the condition of positive direction
and receiving area

3) 反方向、送端

该状态对应图 7, 潮流方向及频率关系与 2) 相同, 只是装置安装处与振荡中心的位置关系不同。图 11 中示出失步过程中 \vec{E}_1 、 \vec{E}_2 、 \vec{U}_M 和 \vec{U}_C 的向量位置。

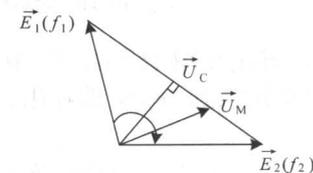


图 11 反方向、送端时的相量图

Fig.11 The vector map at the condition of opposite
direction and sending area

4) 反方向、受端

该状态对应图8，潮流方向及频率关系与1)相同，只是装置安装处与振荡中心的位置关系不同。图12中示出失步过程中 \vec{E}_1 、 \vec{E}_2 、 \vec{U}_M 和 \vec{U}_C 的向量位置。

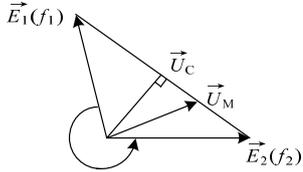


图12 反方向、受端时的相量图

Fig.12 The vector map at the condition of opposite direction and receiving area

5) 若振荡中心恰好落在装置安装处附近

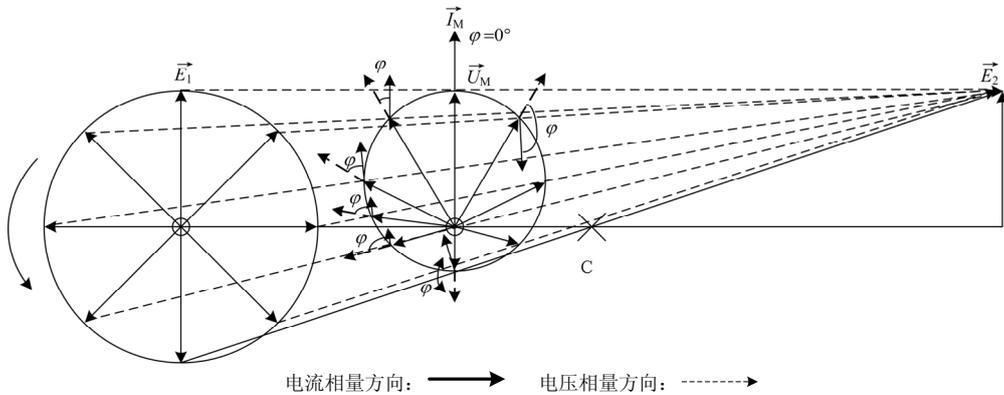


图13 图9情况下相位角φ的变化规律

Fig.13 The phase angle φ's changing discipline at the Fig.9 condition

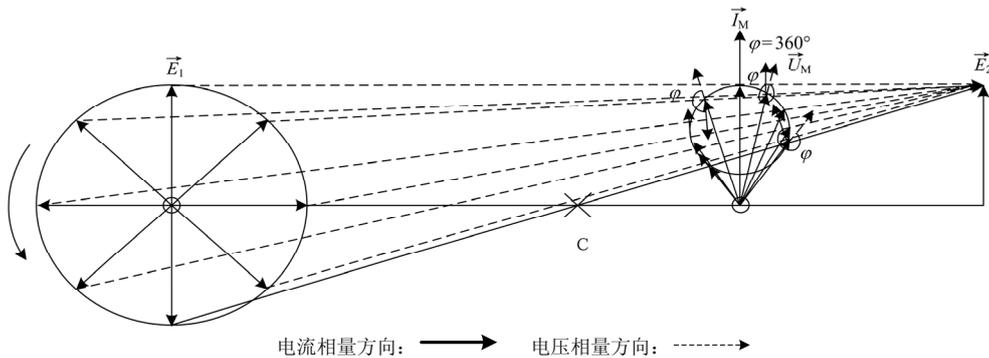


图14 图11情况下相位角φ的变化规律

Fig. 14 The phase angle φ's changing discipline at the Fig.11 condition

同理，可以推出在图11情况下，在失步过程中相位角φ从180°增加到360°，即在III、IV象限范围内周期变化。

另外，显然，若振荡中心恰好落在装置安装处附近，相位角φ在0°与180°两个状态之间来回翻转。

该状态为其实是前述四种状态的特殊情形，即，

\vec{U}_M 与 \vec{U}_C 接近重合。

图13中示出图9情况下相位角φ的变化规律，为便于分析，设负载为纯感性，即电流 \vec{I}_M 角度落后于 $(\vec{E}_1 - \vec{E}_2)$ 90°。显然在失步过程中相位角φ从0°增加到180°，即在I、II象限范围内周期变化。

同理，可以推出在图10情况下，在失步过程中相位角φ从180°减小到0°，即在II、I象限范围内周期变化。

图14示出图12情况下相位角φ的变化规律，显然在失步过程中相位角φ从360°减小到180°，即在IV、III象限范围内周期变化。

上述分析时，假定线路为纯感性，线路阻抗角为90°，实际系统中线路阻抗角并不是90°，有能量损耗，所以往往在分析过程中加上角度补偿（视不同的系统而不同），这样会更准确些。但本文这种失步过程中相位角变化规律的分析方法并不失其一般性。

2 失步振荡时的振荡中心方向判据

首先把四个象限内的相位角 φ 划分为 6 个区:

$\varphi_1 \sim \varphi_2$ 之间为 I 区, $\varphi_2 \sim 90^\circ$ 之间为 II 区, $90^\circ \sim \varphi_3$ 之间为 III 区, $\varphi_3 \sim \varphi_4$ 之间为 IV 区, $\varphi_4 \sim 270^\circ$ 之间为 V 区, $270^\circ \sim \varphi_1$ 之间为 VI 区。系统正常情况下一般运行在 I 区与 IV 区。

根据前面分析的失步振荡过程中相位角的变化规律, 可以把 I—II—III—IV 作为正方向判断区 (见图 15), 把 IV—V—VI—I 作为反方向判断区 (见图 16), 把 I—IV 作为振荡中心附近的判断区 (见图 17)。

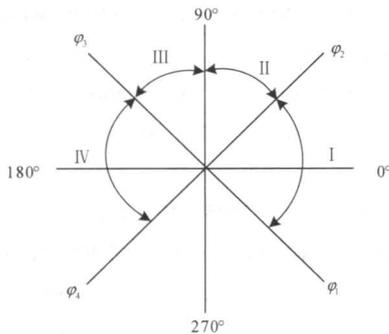


图 15 正方向判断区

Fig.15 The judge area of positive direction

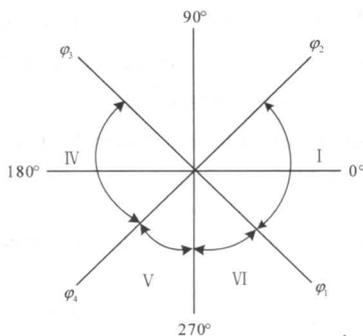


图 16 反方向判断区

Fig.16 The judge area of opposite direction

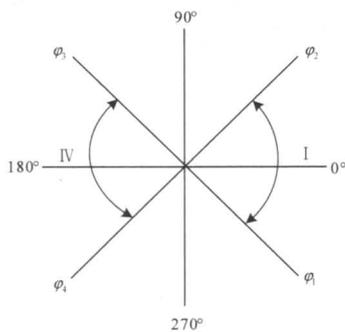


图 17 振荡中心判断区

Fig.17 The judge area of oscillation center

2.1 判断振荡中心在正方向

(1) 正常运行在 I 区时 (送端), 从 I 区开始按顺序经过 II 区、III 区、IV 区, 则认为经历了一个振荡周期;

(2) 正常运行在 IV 区时 (受端), 从 IV 区开始按顺序经过 III 区、II 区、I 区, 也认为经历了一个振荡周期。

2.2 判断振荡中心在反方向

(1) 正常运行在 I 区时, 从 I 区开始按顺序经过 VI 区、V 区、IV 区, 则认为经历了一个振荡周期;

(2) 正常运行在 IV 区时, 从 IV 区开始按顺序经过 V 区、VI 区、I 区, 也认为经历了一个振荡周期。

2.3 判断振荡中心就在装置安装处附近

(1) 电压包络线的最小值必须出现很低数值;

(2) 正常运行在 I 区时, 从 I 区开始突变到 IV 区 (或跨越 II、III 中的一个区), 再回到 I 区, 作为一个失步振荡周期;

(3) 正常运行在 IV 区, 从 IV 区开始变到 I 区 (或跨越 III、II 中的一个区), 再回 IV 区, 作为一个失步振荡周期。

同时满足 (1)、(2) 或 (1)、(3) 时, 判为出现失步振荡, 且振荡中心就在安装处附近。

3 关于相位角原理应用的进一步探讨

相位角原理应用在装置上时, 需要根据实际情况并结合其它辅助条件来保证装置可靠启动并正确动作。

3.1 失步检测的选择性

要求区别失步振荡、同步振荡及短路等故障。

在后两种情形下, 装置不应该动作。

失步振荡与同步振荡较好区分。同步振荡时, 相位角基本不变; 而失步振荡时, 相位角是周期性变化的。

失步振荡时, 三相仍然对称, 系统中没有零序分量出现; 而短路故障时总要长期 (在不对称短路过程中) 或瞬间 (在三相短路开始时) 出现零序分量。建议当线路零序超过零序定值时, 装置应瞬时跳过失步判断。

当振荡中心落在装置安装处附近时, 尤其要注意区分失步与故障。因为区外短路故障可能会引起联络线上的功率重新分配, 引起潮流倒向, 即相位角突变 180° , 而短路故障恢复后, 相位角恢复, 即又突变 180° 。短路故障发生而后再恢复的过程中, 相位角的变化情况跟振荡中心落在装置安装处附近时相似。鉴于短路故障及其恢复时间较短, 可增加

一个“相位角变化持续时间判据”来区分失步振荡和短路故障引起的相位角变化。

3.2 启动判据的结合

相位角原理在装置上实现时，需采用一定的启动判据（如相位角突变启动、功率突变量启动）作为装置启动的条件。单一的启动判据有其局限性，往往需要二者（或多者）相互补充，以达到快速启动的效果。

比如，有时振荡时相位角经历了大半个周期才穿过 90°或 270°（即相位角突变启动判据），此时若采用功率突变量启动判据则可弥补相位角突变启动判据在这种情况下启动较慢的不足；而在线路轻载的情况下，线路失步其功率突变量也达不到功率突变量启动定值，此时若采用相位角突变启动判据则可准确启动。

3.3 起始功率方向判据的必要性

判断装置在受端还是送端，影响着解列地点的选择，让解列后负荷尽可能地留在受端，以使解列瞬间联络线上的功率不平衡量尽可能地小。

4 相位角原理在装置上的应用

基于相位角原理的 UFV-200F 失步解列装置利用装置安装处的电压和电流的相位的变化轨迹来区分失步振荡、同步振荡及故障，该装置能适应大型枢纽变电站、发电站、重要联络线以及小水电、小火电等各种接线方式的电网及多变的运行方式，整定方便。

目前，该装置又应用于国家电网公司 1 000 kV 晋东南-南阳-荆门特高压交流试验示范工程，再次承担起为特高压交流试验示范工程提供技术支撑的重任。

参考文献

[1] DL/T 723-200. 电力系统安全稳定控制技术导则[M]. 北京：中国电力出版社，2000.

[2] 袁季修. 防御大停电的广域保护和紧急控制[M]. 北

京：中国电力出版社，2007.

[3] 高鹏，王建全，周文平，等. 基于无功功率捕捉失步解列断面的理论研究[J]. 电力系统自动化，2005，29（5）：15-20.

GAO Peng, WANG Jian-quan, ZHOU Wen-ping, et al. Theoretical Study on Capturing the Separation Interface of Out-of-step Based on Reactive Power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29（5）：15-20.

[4] 高鹏，王建全，周文平，等. 捕捉失步断面的实现方案及其仿真[J]. 电力系统自动化，2005，29（12）：38-43.

GAO Peng, WANG Jian-quan, ZHOU Wen-ping, et al. Implementation Scheme and Simulation on Capturing the Out-of-step Interface[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29（12）：38-43.

[5] 高鹏，王建全，周文平，等. 关于振荡中心的研究[J]. 电力系统自动化，2005，17（2）：48-53.

GAO Peng, WANG Jian-quan, ZHOU Wen-ping, et al. Study on Oscillation Center[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 17（2）：48-53.

[6] 宗洪良，任祖怡，郑玉平，等. 基于 $u \cos \varphi$ 的失步解列装置[J]. 电力系统自动化，2003，27（19）：83-85.

ZONG Hong-liang, REN Zu-yi, ZHENG Yu-ping, et al. A Out-of-step Splitting Device Based on the Changing Track of the Voltage of Oscillation Center[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27（19）：83-85.

收稿日期：2009-05-09； 修回日期：2009-06-07

作者简介：

董希建（1982-），男，硕士，主要研究方向为电网稳定技术及电力电子技术在电力系统中的应用研究；E-mail: dongxijian@nari-china.com

赵杰（1967-），男，高级工程师，主要研究方向为电力系统继电保护及安全自动装置。