DOI：10.7500/AEPS20131008014

多频振荡下的失步振荡中心变化规律及其定位

刘福锁[1]，方勇杰[1]，李 威[1]，薛 峰[1]，吴雪莲[2]，唐 飞[3]
（1. 国电南瑞科技股份有限公司，江苏省南京市 211106；2. 南京理工大学自动化学院，江苏省南京市 210094；
3. 武汉大学电气工程学院，湖北省武汉市 430072）

摘要：基于三机等值系统，研究了多频振荡下失步振荡中心的特性及其变化规律。在同一失稳模式下，机组不同调导致振荡中心向不同调侧偏移，不同调越明显，偏移量越大。多频失步振荡过程中，同一个时刻仅有一个断面由于机组振荡导致电压为零，为系统失步振荡中心。失步振荡中心出现时，所在线路两侧等值两机系统功角摆开 180°。系统阻抗参数决定了系统振荡中心最大迁移范围，在确定阻抗参数情况下，三机系统功角变化趋势决定了振荡中心迁移方向。传统基于就地信息的解列判据难以适应多频振荡下的失步场景，通过线路两侧相位差摆开 180°的判据，可准确定位多频振荡下失步振荡中心出现时刻及其位置。

关键词：振荡中心；动态迁移；失步振荡；失稳模式

0 引言

电力系统功角稳定破坏后将导致系统失步振荡，失步解列是防止失步导致系统崩溃的最后一道防线，通常是在预先选定的输电断面，以断开输电线路或解列电厂、变电所的母线来实现[1]。为消除振荡，避免事故在电网内大范围扩大，需在潜在的失步振荡中心配置解列控制装置[2]。现有解列控制技术和标准与区域电网间采用边缘联网的模式相适应[1]，其中典型的例子是安装于联络线一侧的、基于就地电气量判据的失步解列或低压解列装置[1]。工程上应用较多的解列判据包括基于相位角的失步解列判据[3]、基于阻抗循序变化的失步解列判据[4]和基于 $u\cos\varphi$ 判别方式的失步解列判据等基于就地信息的判据[5]，其根据振荡中心在解列装置配置点不同位置时，解列装置检测到的电气量不同变化规律来分辨振荡中心位于装置的方向，并结合装置安装点电压值大小估算振荡中心是否在所保护线路上[6]。

振荡中心的动态迁移，给失步解列控制断面的选择和解列控制判据的制定带来一定的挑战，可造成按预先计划配置的解列控制装置不动作或多个解列控制装置无序动作，亟须研究导致振荡中心迁移的主导因素及其变化规律，制定应对策略。随着大电网互联规模的扩大，振荡中心动态迁移问题受到学术界和工程界关注[7-9]。目前，对振荡中心迁移规律的研究都集中在理想两群系统下系统振荡中心的迁移规律，基于两机等值系统得出了联络线两端等值电势幅值不等是导致振荡中心迁移原因的结论[7-9]。机组不同调以及多频振荡下振荡中心迁移规律还鲜见研究报道。本文基于等值三机模型，分析了多频振荡下失步振荡中心特性，研究了机组不同调对振荡中心偏移的影响，探讨了多频振荡下振荡中心变化规律，验证了传统基于就地信息的解列判据的适应性，并提出了适用于多频振荡下失步振荡中心的定位方法，为深入研究振荡中心定位和自适应解列控制策略提供了理论支撑。

收稿日期：2013-10-18；修回日期：2014-06-10。
国家电网公司大电网重大专项资助项目（SGCC-MPLG003-2012）。

1 多频振荡下失步振荡中心

振荡中心指的是某一振荡模式下振荡导致电压跌落最严重的点。在忽略阻抗不均的情况下，在系统等值功角摆开 180°时，该点电压为零，称为失步振荡中心[10]。

1.1 多频振荡下线路上电压过零条件

基于图 1 所示三机系统，研究多频振荡下线路上电压变化规律。

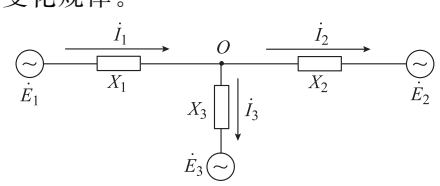


图 1 三机等值系统
Fig.1 Three-unit equivalent electromotive force model

令3台等值机组幅值分别为 E_1,E_2 和 E_3,对应相位分别为 δ_1,δ_2 和 δ_3。由潮流方程可求得:

$$I_1=\frac{(X_3+X_2)E_1\mathrm{e}^{\mathrm{j}\left(\delta_1-\frac{\pi}{2}\right)}}{X_2X_1+X_2X_3+X_3X_1}-\frac{X_3E_2\mathrm{e}^{\mathrm{j}\left(\delta_2-\frac{\pi}{2}\right)}}{X_2X_1+X_2X_3+X_3X_1}-\frac{X_2E_3\mathrm{e}^{\mathrm{j}\left(\delta_3-\frac{\pi}{2}\right)}}{X_2X_1+X_2X_3+X_3X_1} \tag{1}$$

则 O 点电压为:

$$\dot{U}_O=\frac{X_2X_3\dot{E}_1}{X_2X_1+X_2X_3+X_3X_1}+\frac{X_1X_3\dot{E}_2}{X_2X_1+X_2X_3+X_3X_1}+\frac{X_1X_2\dot{E}_3}{X_2X_1+X_2X_3+X_3X_1} \tag{2}$$

令 p_1 表示从电源 $\dot{E}_1$ 侧至 O 侧的电抗 X_1 的百分比,$p_1\in[0,1]$。则 X_1 上距电源 $\dot{E}_1$ 侧 p_1 处的电压可表示为:

$$\dot{U}_{p_1}=U_1\mathrm{e}^{\mathrm{j}\delta_1 t}+U_2\mathrm{e}^{\mathrm{j}\delta_2 t}+U_3\mathrm{e}^{\mathrm{j}\delta_3 t} \tag{3}$$

$$\begin{cases}U_1=\dfrac{(1-p_1)(X_2X_1+X_3X_1)+X_2X_3}{X_2X_1+X_2X_3+X_3X_1}E_1\\ U_2=\dfrac{p_1X_1X_3E_2}{X_2X_1+X_2X_3+X_3X_1}\\ U_3=\dfrac{p_1X_1X_2E_3}{X_2X_1+X_2X_3+X_3X_1}\end{cases} \tag{4}$$

多频振荡时,任一点电压是参与振荡的3个等值电源共同作用的结果,可根据式(3)采用叠加原理进行计算。对于某个确定位置,由3个等值电源单独作用产生的电压相量相加组成一个闭合三角形时,该点电压为零。

1.2 多频振荡导致的电压过零点为系统失步振荡中心

在多频振荡下,线路两侧母线相位(两侧等值系统功角)摆开180°是线路上最低电压过零的充要条件。证明如下。

阻抗 X_1 上的电压降为:

$$\Delta\dot{U}=\dot{E}_1-\dot{U}_O=\frac{X_1X_3(\dot{E}_1-\dot{E}_2)+X_1X_2(\dot{E}_1-\dot{E}_3)}{X_2X_1+X_2X_3+X_3X_1} \tag{5}$$

由式(3)和式(5)可解得:

$$\dot{U}_{p_1}=\dot{E}_1-\frac{p_1X_1X_3(\dot{E}_1-\dot{E}_2)+\rightarrow}{X_2X_1+}$$
$$\leftarrow\frac{p_1X_1X_2(\dot{E}_1-\dot{E}_3)}{X_2X_3+X_3X_1}=\dot{E}_1-p_1\Delta\dot{U} \tag{6}$$

由于 p_1 为实数,$|\dot{U}_{p_1}|=0$ 的必要条件为 $\Delta\dot{U}$ 相位和 $\dot{E}_1$ 相位相同,即 X_1 阻抗两侧相位差等于180°。当 X_1 阻抗两侧相位差为180°时,$|\Delta\dot{U}|\geqslant E_1$。令 $|\dot{U}_{p_1}|=0$,由式(3)和式(5)联立可求得:

$$p_1=\frac{(X_2X_1+X_2X_3+X_3X_1)\dot{E}_1}{X_2X_1(\dot{E}_1-\dot{E}_3)+X_3X_1(\dot{E}_1-\dot{E}_2)}=\frac{\dot{E}_1}{\Delta\dot{U}}=\frac{E_1}{|\Delta\dot{U}|}<1 \tag{7}$$

可见,$p_1\in(0,1]$为有效解。即当 X_1 阻抗两侧相位差等于180°时,X_1 上有且仅有一点电压为零。可见在多频振荡下,线路两侧母线相位(两侧等值系统功角)摆开180°,线路上最低电压为零,该点为系统失步振荡中心。

2 机组不同调导致振荡中心偏移的规律

2.1 多频振荡下线路电压最低点位移函数及其特性

取 $\dot{E}_1=1\angle0°$,令 $E_1=E_2=E_3=E$。将 O 点电压及相位看成一个虚拟等值机,图1所示三机系统可看成3个相互关联的两机系统。分别将 E_1,E_2 和 E_3 作为首端电压,U_O 作为末端电压。

图1中 O 点电压可描述为:

$$\dot{U}_O=\sqrt{m_i^2+n_i^2}\sin\varphi_i\qquad i=1,2,3 \tag{8}$$

$$m_i=X_\Sigma\left(\frac{1}{X_1}\cos(\delta_1-\delta_i)+\frac{1}{X_2}\cos(\delta_2-\delta_i)+\frac{1}{X_3}\cos(\delta_3-\delta_i)\right) \tag{9}$$

$$n_i=X_\Sigma\left(\frac{1}{X_1}\sin(\delta_1-\delta_i)+\frac{1}{X_2}\sin(\delta_2-\delta_i)+\frac{1}{X_3}\sin(\delta_3-\delta_i)\right) \tag{10}$$

$$\varphi_i=\arctan\frac{n_i}{m_i} \tag{11}$$

$$\frac{1}{X_\Sigma}=\frac{1}{X_1}+\frac{1}{X_2}+\frac{1}{X_3} \tag{12}$$

则3个虚拟等值两机系统的两侧电压幅值比 $k_1=k_2=k_3=E/U_O=1/\sqrt{m_i^2+n_i^2}>1$。根据文献[8]关于两机系统中线路上电压最低点位移函数可得 X_1,X_2 和 X_3 所在线路上的电压最低点位移函数 f_1,f_2 和 f_3 如式(13)所示,当 $f_i=1$ 表示该段线路上电压最低点在 O 点。

$$f_i=\begin{cases}\dfrac{1-m_i}{1-2m_i+m_i^2+n_i^2} & m_i<m_i^2+n_i^2\\ 1 & m_i\geqslant m_i^2+n_i^2\end{cases} \tag{13}$$

式中:$i=1,2,3$。

将 f_1 分别对 δ_2 和 δ_3 求导,令 $\mathrm{d}f_1/\mathrm{d}\delta_2=\mathrm{d}f_2/$

$d\delta_3=0$，可求出当 $\delta_2=\delta_3$ 时，f_1 最小，且 $f_{1,\min}=0.5+X_2X_3/[2X_1(X_2+X_3)]$。

可见，三机振荡系统中 X_1 所在线路上最低电压点在靠近 O 点附近做动态迁移，距离 O 点最大偏移量等于对侧等值系统阻抗并联值和本侧线路阻抗比值的一半。且当 $1/X_1\geqslant 1/X_2+1/X_3$ 时，阻抗 X_1 所在线路上电压最低点在 O 点。同理，可求得 $1/X_2\geqslant 1/X_1+1/X_3$ 时，阻抗 X_2 所在线路上电压最低点在 O 点；$1/X_3\geqslant 1/X_2+1/X_1$ 时，阻抗 X_3 所在线路上电压最低点在 O 点。

深入分析可知，同一系统中不可能出现两条及以上线路同时满足最低点都在 O 点的场景，最多只有一条线路上电压最低点始终落在 O 点。系统振荡中心不会落在该线路上。

2.2　机组不同调对振荡中心的影响

以 $\dot{E}_3$ 和 $\dot{E}_2$ 相对 $\dot{E}_1$ 发生失步振荡模式研究机组不同调对振荡中心迁移的影响规律。令 $\dot{E}_3$ 为主导振荡机组，$\dot{E}_2$ 和 $\dot{E}_3$ 不同调，$\delta_2-\delta_3\in(-0.5\pi,0.5\pi)$，为排除机组等值电势不等对振荡中心迁移的影响，令 $E_1=E_2=E_3=1$。则图 1 所示三机系统，可等值成如图 2 所示两机系统分析，图中，$X_{2,3}=X_2X_3/(X_2+X_3)$。

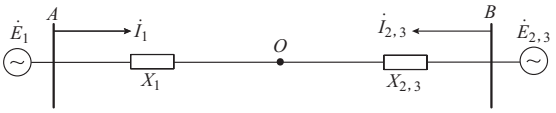


图 2　等效两机系统
Fig.2　Equivalent two-unit system

可求得等值电势 $\dot{E}_{2,3}$ 为：

$$\dot{E}_{2,3}=\frac{\sqrt{X_2^2+X_3^3+2X_2X_3\cos(\delta_2-\delta_3)}}{X_2+X_3}\sin\left(\delta_3+\arctan\frac{X_3\sin(\delta_2-\delta_3)}{X_3\cos(\delta_2-\delta_3)+X_2}\right)\tag{14}$$

可见，$E_{2,3}\leqslant 1$。首端与末端的电压幅值比 k 为：

$$k=\frac{X_2+X_3}{\sqrt{X_2^2+X_3^3+2X_2X_3\cos(\delta_2-\delta_3)}}>1\tag{15}$$

图 2 所示等值两机系统的功角差为：

$$\delta_\Delta=\delta_3+\arctan\frac{X_3\sin(\delta_2-\delta_3)}{X_3\cos(\delta_2-\delta_3)+X_2}\tag{16}$$

由两机系统等值电势不等导致的振荡中心迁移函数[8]可知，图 2 所示两机系统振荡位移函数如式(17)所示。其中，$f(\delta_\Delta)$ 为振荡中心到首端 A 点的距离占线路总长度的比例。

$$f(\delta_\Delta)=\begin{cases}\dfrac{k^2-k\cos\delta_\Delta}{k^2+1-2k\cos\delta_\Delta} & \delta_\Delta\in\left[\arccos\dfrac{1}{k},2\pi-\arccos\dfrac{1}{k}\right]\\ 1 & \delta_\Delta\in\left(0,\arccos\dfrac{1}{k}\right)\cup\left(2\pi-\arccos\dfrac{1}{k},2\pi\right)\end{cases}\tag{17}$$

当 $\delta_2-\delta_3\in(-0.5\pi,0)$ 时，k 随着 $\delta_2-\delta_3$ 增大而单调递减；当 $\delta_2-\delta_3\in(0,0.5\pi)$ 时，k 随着 $\delta_2-\delta_3$ 增大而递增。当 $\delta_2-\delta_3\in(-0.5\pi,0.5\pi)$，$\delta_\Delta$ 随着 $\delta_2-\delta_3$ 增大而增大。

可见，在相同 δ_3 下，$|\delta_2-\delta_3|$ 越大，即机组不同调越明显，$(k^2-k\cos\delta_\Delta)/(k^2+1-2k\cos\delta_\Delta)$ 越大，即振荡中心向不同调侧偏移越大。当 $\delta_2-\delta_3=0$，即机组完全同调时，振荡中心在等值两机系统联络线阻抗的中点。如取 $X_1:X_2:X_3=10:5:4$，不同 δ_3 下机组不同调导致振荡中心迁移情况如图 3 所示。

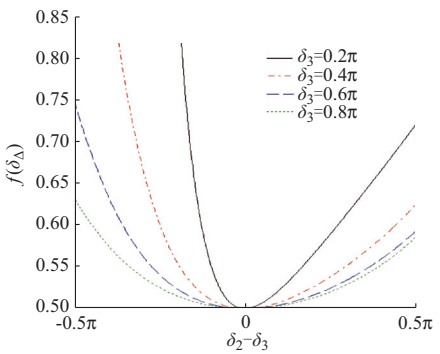


图 3　机组不同调导致振荡中心迁移示意图
Fig.3　Schematic diagram of oscillation center migration caused by units oscillation

2.3　失步振荡中心变化规律

在三机系统中，存在振荡模式的更迭，为明确三机系统的振荡中心的位置变化规律，需确定 3 条联络线上最小的电压幅值点，即三机系统振荡中心。

由于 $m_i<p$ 时，$df_i/dm_i=(1-p)/(1-2m_i+p)^2>0$，则 f_i 随 m_i 减小单调减小。

由文献[8]研究结论可知：当 $k>1$ 时，在相同 k 值下，振荡中心位移函数 f_i 越小，对应振荡中心电压幅值越小。由于 $k_1=k_2=k_3>1$，因此，三机系统的振荡中心在 m_i 最小的那条联络线上。

由 2.1 节分析可知，三机系统中仅可能存在一条线路由于阻抗小于等于其他两条阻抗并联值时，振荡中心不会在该条线路上，取 $X_1:X_2:X_3=10:5:3$，满足 $1/X_3\geqslant 1/X_2+1/X_1$，则系统振荡中心在阻抗 X_1 和 X_2 所在线路上的分布条件如图 4

所示。取 $X_1:X_2:X_3=10:5:4$,系统振荡中心在系统中的分布情况如图 5 所示。

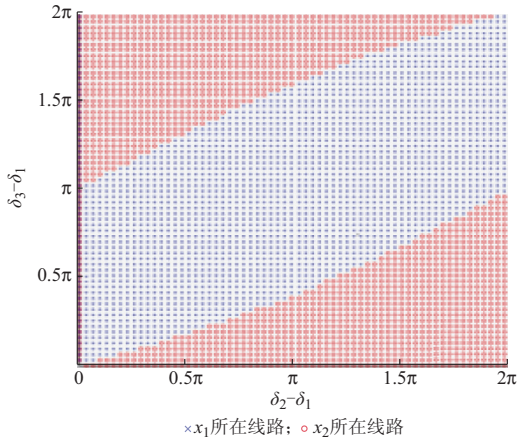


图 4 振荡中心仅分布在两条线路上时的边界条件
Fig.4 Boundary conditions of oscillation center located in two lines

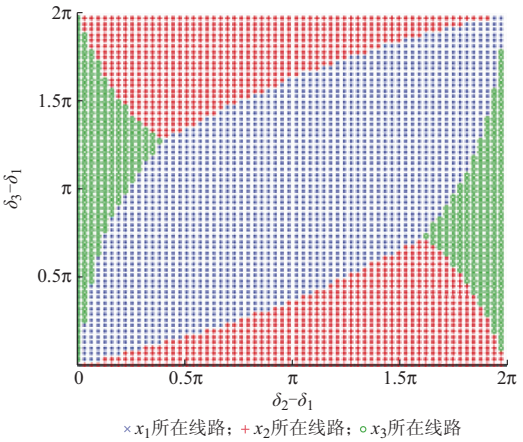


图 5 振荡中心分布在 3 条线路上时的边界条件
Fig.5 Boundary conditions of oscillation center located in three lines

可见,多频系统振荡下,系统阻抗参数决定了系统振荡中心最大迁移范围。当某条线路阻抗小于其他两条线路阻抗的并联值时,振荡中心仅在其他两条线路上迁移。当所有线路阻抗均值都大于其他两条线路的并联值,振荡中心可在 3 条线路中做动态迁移。在确定阻抗参数情况下,振荡中心迁移方向由系统功角变化趋势决定。

3 多频振荡下失步振荡的识别

3.1 电气量变化特性

假设 $E_1=E_2=E_3=1$,E_1 相位为零,E_2 和 E_3 分别以 $w_1=2(°)/s$ 和 $w_3=3(°)/s$ 绕着 E_2 旋转,$X_1=10\ \Omega$,$X_2=5\ \Omega$,$X_3=4\ \Omega$。失步振荡过程中,线路两侧电压相位差如图 6 所示,各条线路最低电压及其位置分别如图 7 所示。图中,p_2 和 p_3 分别为从电源 $\dot{E}_2$ 和 $\dot{E}_3$ 侧至 O 侧的电抗 X_2 和 X_3 的百分比。

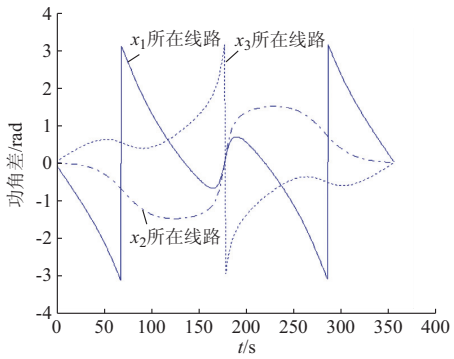


图 6 线路两侧功角差
Fig.6 Angle difference of line on both sides

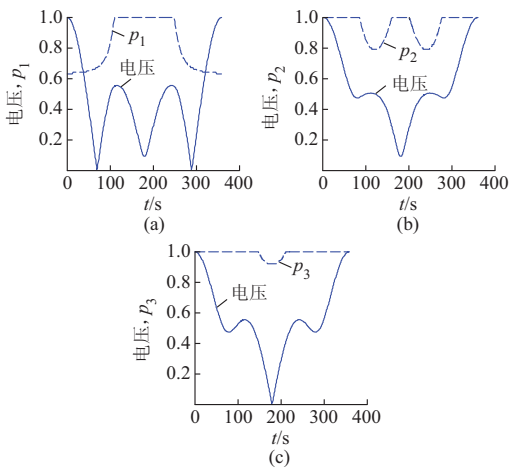


图 7 线路最低电压及其位置
Fig.7 Line minimum voltage and its position

可见,在 73 s 和 287 s 时,X_2 上距离 1 号等值机送端 70%处最低电压达到零。在 180 s 时,X_3 上距离 3 号等值机 93%处最低电压达到零,对应时刻线路两侧相位相差 180°。失步振荡中心在 X_2 和 X_3 上做动态迁移。

3.2 传统判据适应性

以工程上广泛应用的基于相位角的失步振荡解列判据为例,分析传统基于就地信息的判据在多频振荡下的适应性。基于相位角的失步振荡判断逻辑[11-12]简介如下。

将图 8 所示相位角可能穿越的 4 个象限分为 6 个区:φ_1 至 φ_2 之间为Ⅰ区,φ_2 至 90°之间为Ⅱ区,90°至 φ_3 之间为Ⅲ区,φ_3 至 φ_4 之间为Ⅳ区,φ_4 至 270°之间为Ⅴ区,270°至 φ_1 之间为Ⅵ区。系统正常情况下一般运行在Ⅰ区与Ⅳ区。将Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ-Ⅳ作为正方向判断区,把Ⅳ-Ⅴ-Ⅵ-Ⅰ作为反方向判断区,把

Ⅰ-Ⅳ作为振荡中心附近的判断区。从Ⅰ区或从Ⅳ区依次穿越4个区域判断系统失步一个周期。

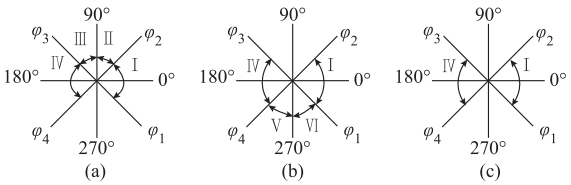


图8　相位角的区域划分
Fig.8　Regional division of angle difference

假设在图1所示三机系统O点配置基于相位角原理的解列装置，监测上述所示失步振荡场景下X_1，X_2和X_3所在线路的相位角以及O点电压幅值，分别如图9和图10所示。

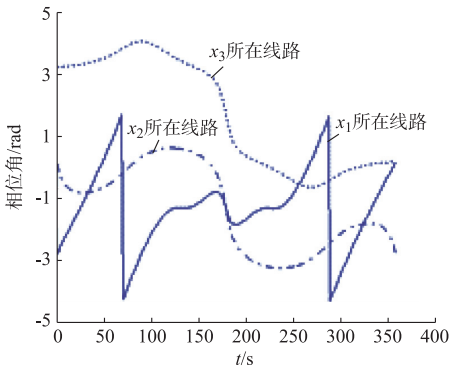


图9　各条线路相位角
Fig.9　Angle difference of each line

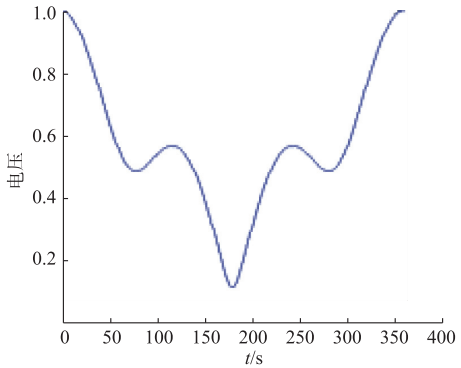


图10　O点电压幅值
Fig.10　Voltage magnitude at point O

根据基于相位角原理的判断逻辑，失步振荡情况判断结果如下。

1)监测X_1所在线路的装置：在0～70 s，70～125 s，250～330 s和330～360 s这4个时间段内分别失步一个周期，且振荡中心落在X_1内部。

2)监测X_2所在线路的装置：系统在150～190 s时间段内系统失步一个周期，振荡中心均落在X_2内部。

3)监测X_3所在线路的装置：系统在75～230 s时间段内失步一个周期，振荡中心落在X_3内部。

可见，在多频振荡下，基于理想两机系统得到的相位角和系统功角差之间的对应关系不复存在。对比3.1节基于广域信息的失步振荡判断及失步振荡中心定位情况可见，基于就地信息的失步判据，存在误判失步的风险。

3.3　机组不同调场景下失步振荡中心定位

多频振荡场景下，失步振荡中心的位置和出现时刻是参与振荡的多个等值电源共同作用的结果。难以基于就地信息识别失步振荡变化规律，特别在在非线性极强的复杂电网中，很难通过就地信息识别振荡中心。

即使在多频振荡下，失步振荡中心仍满足电压过零的条件，对应失步振荡中心所在线路两侧母线相位差仍摆开180°。基于该特点，通过线路两侧相位差摆开180°的判据，可准判断多频振荡下失步振荡中心出现时刻及其位置。具体实用定位策略还需深入研究。

4　结论

1)在多频振荡下，失步振荡中心仍满足电压过零的条件，且同一时刻仅有一个断面上由于失步振荡导致电压为零，此时，失步振荡中心所在线路两侧母线相位差摆开180°。

2)基于理想两群振荡模式开发的基于就地信息的解列判据难以适应多频振荡场景，存在误判的风险。通过线路两侧相位差摆开180°的判据，可准确定位失步振荡中心落在该条线路上。

3)在同一失稳模式下，机组不同调导致振荡中心向不同调侧偏移，不同调越明显，偏移量越大。

4)三频振荡下，系统阻抗参数决定了系统振荡中心最大迁移范围。当某条线路阻抗小于其他两条线路阻抗的并联值时，振荡中心仅在其他两条线路上迁移，当所有线路阻抗均值都大于其他两条线路的并联值，振荡中心可在3条线路中做动态迁移。在确定阻抗参数情况下，三机系统功角变化趋势决定了振荡中心迁移方向。

参 考 文 献

[1] 方勇杰.自适应解列控制[J].电力系统自动化，2007，31(34)：41-44.
FANG Yongjie. Adaptive islanding control of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems，2007，31(34)：41-44.

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

[3] 罗建波，宣筱青，任建峰，等.UFV-200F失步解列装置的特高压

电网实际参数动模试验[J].电网技术,2008,32(18):10-13.
LUO Jianbo, XUAN Xiaoqing, REN Jianfeng, et al. Application of UFV-200F out-of-step separation device [J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 10-13.

[4] 陈西颖,李卫星,郭志忠.电力系统失步解列研究[J].继电器,2006,34(8):30-34.
CHEN Xiying, LI Weixing, GUO Zhizhong. Research of wide area measure system based criteria for detecting the synchronization loss for power system[J]. Relay, 2006, 34(8): 30-34.

[5] 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 Hongliang, REN Zuyi, ZHENG Yuping, 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.

[6] 刘福锁,杨卫东,方勇杰,等.失步解列装置两级配置方案[J].电力系统自动化,2009,33(18):57-60.
LIU Fusuo, YANG Weidong, FANG Yongjie, et al. Two level setting scheme for out-of-step islanding device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 57-60.

[7] 夏成军,周良松,彭波德,等.关于振荡中心偏移的探讨[J].继电器,2002,30(3):1-5.
XIA Chengjun, ZHOU Liangsong, PENG Bode, et al. Study on system oscillation center movement[J]. Relay, 2002, 30(3): 1-5.

[8] 高鹏,王健全,周文平,等.关于振荡中心点研究[J].电力系统及其自动化学报,2005,17(2):16-20.
GAO Peng, WANG Jianquan, ZHOU Wenping, et al. Study on oscillation center [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(2): 16-20.

[9] 姚李孝,宁卜,沈东方,等.异步运行状态下振荡中心研究[J].电网与清洁能源,2008,24(6):39-41.
YAO Lixiao, NING Bo, SHEN Dongfang, et al. Study on oscillation center in asynchronous[J]. Power System and Clean Energy, 2008, 24(6): 39-41.

[10] 高鹏,王健全,甘德强,等.电力系统失步解列综述[J].电力系统自动化,2005,29(19):90-96.
GAO Peng, WANG Jianquan, GAN Deqiang, et al. Review on power system out-of-step separation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 90-96.

[11] 南京南瑞集团公司电网安全稳定控制技术分公司.UFV-200F型失步解列装置技术及使用说明书(V1.3)[S].2006.

[12] 董希建,赵杰,凌超,等.基于相位角原理的失步振荡解列判据机理研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(7):1-6.
DONG Xijian, ZHAO Jie, LING Chao, et al. Research on out of step oscillation criterion based on principle of phase angle [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 1-6.

刘福锁(1981—),男,通信作者,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: liufusuo@sgepri.sgcc.com.cn

方勇杰(1964—),男,博士,研究员级高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: fangyongjie@sgepri.sgcc.com.cn

李 威(1976—),男,博士,研究员级高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: liwei10@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 万志超)

Out-of-step Oscillation Center Change Rules and Its Location Under Multi-frequency Oscillation

LIU Fusuo[1], *FANG Yongjie*[1], *LI Wei*[1], *XUE Feng*[1], *WU Xuelian*[2], *TANG Fei*[3]

(1. NARI Technology Co. Ltd., Nanjing 211106, China;
2. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
3. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Out-of-step oscillation center and its location under multi-frequency oscillation are studied based on a three machine equivalent system. In the same unstable mode, units with different angles cause the oscillation center to migrate to differently modulated sides. The more distinct the different modulations, the greater the offset. Under multi-frequency oscillation, the out-of-step oscillation center still satisfies the condition that voltage is zero. There is only one section whose minimum voltage is equal to zero because of unit oscillation at the same moment, which is the out-of-step oscillation center. When the center appears, the equivalent two machine system power angle on both sides of the line where the center is located swings 180° apart. The maximum range of oscillation center migration is determined by the system impedance parameters. With the impedance parameters determined, the oscillation center migration direction is determined by the three machine system power angle variation tendency. The traditional criteria based on local information can hardly adapt to the multi frequency oscillation scenario. The criterion that the phase difference on both sides of the line swings 180° apart is able to accurately determine the moment the out-of-step oscillation center appears and its location under multi frequency oscillation.

This work is supported by State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid (No. SGCC-MPLG003-2012).

Key words: oscillation center; live migration; out-of-step oscillation; unstable mode