

基于广域测量信息的失步中心快速定位方法

张艳霞, 李 杰, 张 帅, 李多多, 尹佳鑫

(天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:研究了能够减小系统频率偏移影响的相量算法,提出了一种基于母线电压的失步振荡识别方法和一种失步中心快速定位的新方法。所提定位方法依靠广域测量系统上传的 3 组电压、电流数据,在系统两侧电势幅值不等和全系统阻抗角不同同时存在的场景下,通过求解测量阻抗轨迹方程与全系统阻抗折线方程的交点,能够在失步振荡发生后而两侧电势相角差未达到 180° 时定位失步中心所在元件,并利用实时测量数据与理论计算值存在的关系确定失步中心出现的时刻,从而为复杂电力系统失步解列断面的确定和解列时刻的选择提供依据。仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词:失步解列;频率偏移;相量算法;广域测量;失步振荡识别;失步中心定位

中图分类号:TM 712

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.04.001

0 引言

失步解列是确保电力系统安全稳定运行的第三道防线^[1-3]。当系统受到大扰动并引发稳定性破坏事故时,快速解列失步机群可有效地将故障影响限定在有限的区域内,这样不仅能保证剩余系统稳定运行,还能最大限度地减小经济损失。失步解列的基础是振荡中心和失步中心的跟踪和定位,而现有的振荡中心捕捉和失步中心定位方法都是基于就地测量量^[4-5]的。基于阻抗原理的失步解列装置利用测量阻抗的运动轨迹区分短路、同步振荡和失步振荡,利用最小测量阻抗判别振荡中心是否在本线路上,该原理在世界范围内得到了广泛的应用^[6],但其不能适应网络结构变化和系统运行方式的改变。基于 $U\cos\varphi$ 的失步解列判据^[7]可以捕捉振荡中心出现的时刻,但不能确定失步中心的位置,且在线路阻抗角不等于 90° 时需进行补偿。文献[8-9]利用线路两端电气量频率的差异识别振荡中心,具有实用价值。广域测量系统 WAMS (Wide Area Measurement System) 的出现为振荡中心和失步中心的跟踪和定位提供了新的平台,文献[10]基于广域测量信息分析了系统两侧电势幅值不等和全系统阻抗角不同同时存在的场景下振荡中心的漂移规律;文献[11]利用广域测量信息得到的实时电压数据进行失步中心的定位和振荡中心的跟踪,不受电网结构变化的影响,但不能在第一个振荡周期内实现快速失步解列。

好的振荡中心和失步中心跟踪与定位方法应该能够适应电网结构的变化和系统运行方式的改变。失步解列控制应从系统的角度出发,基于广域测量信息动态地确定失步中心所在的位置从而确定失步解列断面^[12]。本文给出了一种利用母线电压识别系统失步振荡的判据,提出了一种基于测量阻抗

快速定位失步中心的方法。该失步中心定位方法可以在失步振荡发生后仅依靠广域测量的 3 组数据快速找到失步中心所在元件,并且在振荡过程中实时监测广域测量数据的变化,从而确定失步中心出现的时刻,为实时的失步解列控制提供了基础。

1 减少系统频率偏移影响的相量算法

全波傅里叶算法是处理离散周期信号最常用的相量算法,能够滤除纯直流分量和整数次谐波分量,具有良好的数字滤波特性^[13],但该算法的准确性依赖于信号频率的稳定。而电力系统发生失步振荡时,系统频率偏离 50 Hz,此情况下利用全波傅里叶算法计算电压、电流的幅值和相位会产生较大的误差。因此,研究减小系统频率偏移影响的相量算法以准确计算失步振荡过程中的电压和电流很有必要。

当电气量的频率发生偏移时,全波傅里叶算法的主要误差来源于实际采样点与变换公式中系数要求的采样点不对应。可以通过捕捉电气量的实时频率计算信号周期 T ,以此修正全波傅里叶算法的采样点数和计算公式,提高相量计算的精度。

如图 1 所示,选定 AB 两相进行频率的快速计算。B 相过零点 O_2 滞后 A 相过零点 O_1 的角度为 $\Delta\theta$,理论上 $\Delta\theta = 2\pi/3$,对应的时间为 $T/3$ 。设采样频率为 f_s ,采样间隔 $\Delta t = 1/f_s$,A 相从负到正过零前一点采样数据为 X_{A1} ,后一点采样数据为 X_{A2} ;B 相从

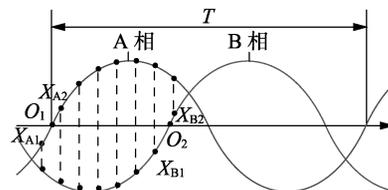


图 1 频率测量

Fig.1 Frequency measurement

负到正过零前一点采样数据为 X_{B1} , 后一点采样数据为 X_{B2} , AB 两相过零点之间的采样点数为 K , 则电气量满足式(1)。

$$\frac{T}{3} \approx (K-1)\Delta t + \frac{X_{A2}}{X_{A2} + |X_{A1}|} \Delta t + \frac{|X_{B1}|}{X_{B2} + |X_{B1}|} \Delta t \quad (1)$$

因此,有:

$$f = \frac{1}{T} = 1 / \left\{ 3 \left[(K-1)\Delta t + \frac{X_{A2}}{X_{A2} + |X_{A1}|} \Delta t + \frac{|X_{B1}|}{X_{B2} + |X_{B1}|} \Delta t \right] \right\} \quad (2)$$

该方法可以在 $1/3$ 个周期内快速计算电气量的实时频率。在频率 f 已知的前提下,每周期的采样点数为:

$$N^* = \langle T/\Delta t \rangle = \langle 1/(f\Delta t) \rangle \quad (3)$$

其中, $\langle \rangle$ 表示四舍五入取整。以此对离散全波傅里叶变换公式进行修正,得:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{2}{N^*} \sum_{k=1}^{N^*} X_k \sin\left(k \frac{2\pi}{N^*}\right) \\ b_1 = \frac{2}{N^*} \sum_{k=1}^{N^*} X_k \cos\left(k \frac{2\pi}{N^*}\right) \end{cases} \quad (4)$$

其中, a_1 和 b_1 分别为基波分量正弦和余弦的振幅; X_k 为第 k 次采样值。可见,利用式(1)~(4)可以根据电气量的频率偏移自适应地改变计算窗长,减小系统频率偏移的影响。

对全波傅里叶算法与式(4)所示变窗长的傅里叶算法进行比较,设电气量为:

$$\begin{cases} X_A = \sqrt{2} \sin(2\pi ft) \\ X_B = \sqrt{2} \sin(2\pi ft - 120^\circ) \\ X_C = \sqrt{2} \sin(2\pi ft - 240^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

分别取 f 为 52 Hz 和 55 Hz, 采样频率为 4 000 Hz, 利用本文所提频率快速算法求得的频率分别为 51.999 6 Hz 和 54.999 9 Hz, 根据频率对傅里叶变换公式进行修正。图 2 给出了全波傅里叶算法和变窗长傅里叶算法的幅值对比。由图 2 可见,后者所得幅值更加准确,可用于广域测量系统的相量计算。

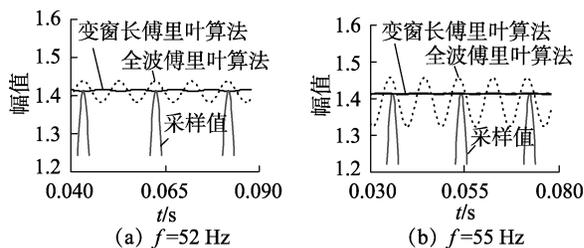


图 2 2 种算法的幅值对比

Fig.2 Amplitude comparison between two algorithms

2 基于广域信息的系统振荡识别

当系统发生失步振荡时,等值 2 机系统两侧的电势相角差 δ 从 0° 到 360° 周期性变化,两侧等值系统出口母线电压的相角差 θ 也从 0° 到 360° 周期性变化。当系统振荡到 $\theta=120^\circ$ 时,两侧等值系统出口母线的电压差 U_{ij120° 与 θ 的关系如图 3 所示,则有:

$$|U_{ij120^\circ}| = \sqrt{U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos 120^\circ} \quad (6)$$

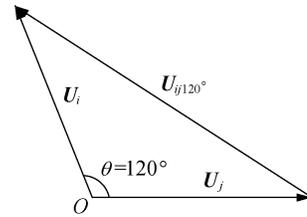


图 3 两侧等值系统出口母线电压差

Fig.3 Voltage difference of outlet bus of equivalent two terminal power system

随着失步振荡的进行, θ 不断增大,两侧等值系统出口母线电压差的幅值 U_{ij} 不断增大,并在 $\theta=180^\circ$ 时达到最大值。因此,可利用 U_{ij} 的变化特点构成失步振荡识别判据如下:

$$U_{ijk} \geq U_{ij120^\circ} \quad k=1,2,3 \quad (7)$$

连续 3 次广域测量数据满足式(7),则判定为失步振荡。考虑电力系统失步振荡周期最小为 0.2 s^[14],广域测量系统每隔 10 ms 上传一次相量数据^[15], θ 从 120° 变化到 180° 的过程中,广域测量系统在最不利的情况下至少可以上传 3 组数据,而判据利用 3 组数据识别失步振荡,进而启动失步中心定位程序。

3 基于广域测量信息的失步中心快速定位

3.1 由广域测量信息得到系统失步振荡时的测量阻抗轨迹方程

在图 4 所示的两端等值系统中,设 E_s 围绕 E_w 逆时针旋转, $\rho_E = E_w/E_s$, Z_{MA} 、 Z_{AB} 和 Z_{BN} 分别为线路 MA、AB 和 BN 的阻抗, Z_M 和 Z_N 分别为 M 侧和 N 侧等值系统的阻抗。系统发生失步振荡后,利用广域测量得到了 M 侧的电压相量和电流相量,进而求得的正序分量在 3 个不同时刻的 3 组相量分别为 $U_{11} \angle \theta_{1u1}$ 、 $I_{11} \angle \theta_{1i1}$, $U_{12} \angle \theta_{1u2}$ 、 $I_{12} \angle \theta_{1i2}$ 以及 $U_{13} \angle \theta_{1u3}$ 、 $I_{13} \angle \theta_{1i3}$, 由此算得的 3 个时刻的正序测量阻抗与 0°

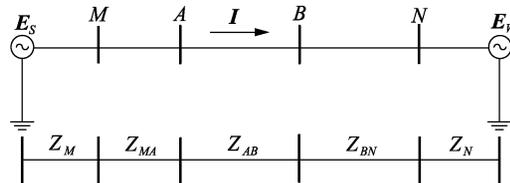


图 4 两端等值系统

Fig.4 Equivalent two terminal power system

接线的测量阻抗相同,为:

$$\begin{cases} Z_1 \angle \theta_1 = \frac{U_{11} \angle \theta_{1u1}}{I_{11} \angle \theta_{1i1}} = Z_1 \cos \theta_1 + jZ_1 \sin \theta_1 = R_1 + jX_1 \\ Z_2 \angle \theta_2 = \frac{U_{12} \angle \theta_{1u2}}{I_{12} \angle \theta_{1i2}} = Z_2 \cos \theta_2 + jZ_2 \sin \theta_2 = R_2 + jX_2 \\ Z_3 \angle \theta_3 = \frac{U_{13} \angle \theta_{1u3}}{I_{13} \angle \theta_{1i3}} = Z_3 \cos \theta_3 + jZ_3 \sin \theta_3 = R_3 + jX_3 \end{cases} \quad (8)$$

将 M 点置于复数 Z 平面的原点,则各元件阻抗如图 5 中折线 $SMABNW$ 所示。在 Z 平面中标出式 (8) 所示的 3 个测量阻抗: O_1 , 坐标为 (R_1, X_1) , $R_1 = Z_1 \cos \theta_1$, $X_1 = Z_1 \sin \theta_1$; O_2 , 坐标为 (R_2, X_2) , $R_2 = Z_2 \cos \theta_2$, $X_2 = Z_2 \sin \theta_2$; O_3 , 坐标为 (R_3, X_3) , $R_3 = Z_3 \cos \theta_3$, $X_3 = Z_3 \sin \theta_3$ 。

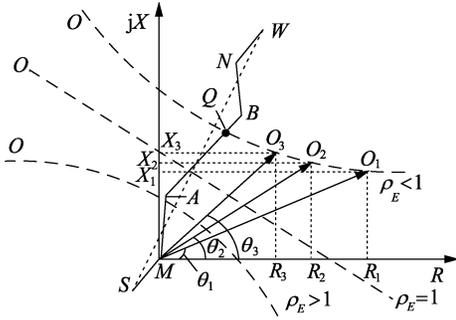


图 5 3 个不同的测量阻抗

Fig.5 Three different measured impedances

$\rho_E = E_R/E_S = 1$ 时, M 侧测量阻抗的轨迹为一条直线,其斜率为:

$$k_M = \frac{X_1 - X_2}{R_1 - R_2} \quad (9)$$

直线方程为:

$$X - X_1 = k_M (R - R_1) = \frac{X_1 - X_2}{R_1 - R_2} (R - R_1) \quad (10)$$

$\rho_E = E_W/E_S \neq 1$ 时, M 侧测量阻抗轨迹为一个圆,其标准方程为:

$$(R - R_0)^2 + (X - X_0)^2 = r^2 \quad (11)$$

其中, (R_0, X_0) 为圆心坐标; r 为半径。为了求出 R_0 、 X_0 和 r 这 3 个未知数,将 O_1 、 O_2 、 O_3 这 3 个点的坐标代入式 (11) 解得:

$$\begin{cases} R_0 = \frac{[(R_3^2 + X_3^2) - (R_2^2 + X_2^2)](X_1 - X_2)}{2[(R_3 - R_2)(X_1 - X_2) - (R_1 - R_2)(X_3 - X_2)]} \\ X_0 = \frac{[(R_3^2 + X_3^2) - (R_2^2 + X_2^2)](R_1 - R_2)}{2[(R_1 - R_2)(X_3 - X_2) - (R_3 - R_2)(X_1 - X_2)]} \\ r = \sqrt{(R_0 - R_1)^2 + (X_0 - X_1)^2} \end{cases} \quad (12)$$

由上述分析可知,系统发生失步振荡后,由 3 个点的广域测量信息即可获得 M 侧测量阻抗为式 (10) 或式 (11), 对应的测量阻抗轨迹 O 如图 5 所示。

3.2 失步中心定位方法

$Z_{MA} = R_{MA} + jX_{MA} = |Z_{MA}| \angle \theta_{MA}$ 为线路 MA 阻抗, 点 A 在图 5 中坐标为 (R_{MA}, X_{MA}) , 记为 (R_A, X_A) , MA 所在直线的方程为:

$$X = R \tan \theta_{MA} \quad (13)$$

$Z_{AB} = R_{AB} + jX_{AB} = |Z_{AB}| \angle \theta_{AB}$ 为线路 AB 的阻抗, 点 B 在图 5 中坐标为 $(R_{MA} + R_{AB}, X_{MA} + X_{AB})$, 记为 (R_B, X_B) , AB 所在直线的方程为:

$$X = X_A + (R - R_A) \tan \theta_{AB} \quad (14)$$

$Z_{BN} = R_{BN} + jX_{BN} = |Z_{BN}| \angle \theta_{BN}$ 为线路 BN 阻抗, 点 N 在图 5 中坐标为 $(R_{MA} + R_{AB} + R_{BN}, X_{MA} + X_{AB} + X_{BN})$, 记为 (R_N, X_N) , BN 所在直线的方程为:

$$X = X_B + (R - R_B) \tan \theta_{BN} \quad (15)$$

因此,线路 MA 、 AB 、 BN 阻抗的分段方程为:

$$\begin{cases} X = R \tan \theta_{MA} & 0 \leq R < R_A \\ X = X_A + (R - R_A) \tan \theta_{AB} & R_A \leq R < R_B \\ X = X_B + (R - R_B) \tan \theta_{BN} & R_B \leq R < R_N \end{cases} \quad (16)$$

根据定义,失步中心是在一个振荡周期内 $\delta \approx 180^\circ$ 时刻电压幅值降为 0 的点。在图 5 中,设折线 $SMABNW$ 与 $\rho_E < 1$ 时的测量阻抗轨迹圆 O 的交点为 Q , 当动点 O 在测量阻抗轨迹上运动到点 Q 时,点 Q 到动点 O 的连线长度为 0,即在点 Q 的测量阻抗值为 0,其对应的测量电压也为 0。点 Q 便是 $\rho_E < 1$ 时轨迹圆对应的失步中心。

由此可知,测量阻抗轨迹 O (圆或直线) 与全系统阻抗折线 $SMABNW$ 在 Z 平面上的交点就是失步中心。以下分 2 种情况求解失步中心。

第一种情况: $\rho_E = E_W/E_S = 1$ 时,测量阻抗轨迹 O 为式 (10) 所示的一条直线,联立式 (10) 和 (16) 求解交点 $Q(R_Q, X_Q)$ 。

先求式 (10) 与式 (16) 中 MA 的交点,解得:

$$\begin{cases} R_Q = \frac{X_2 R_1 - X_1 R_2}{(R_1 - R_2) \tan \theta_{MA} - (X_1 - X_2)} \\ X_Q = \frac{X_2 R_1 - X_1 R_2}{(R_1 - R_2) \tan \theta_{MA} - (X_1 - X_2)} \tan \theta_{MA} \end{cases} \quad (17)$$

若 $R_Q < 0$, 则失步中心位于 S 侧等值系统中; 若满足 $0 \leq R_Q < R_A$, 则失步中心在线路 MA 上; 若 $R_Q \geq R_A$, 则进行下一步计算。

求式 (10) 与式 (16) 中 AB 的交点,解得:

$$\begin{cases} R_Q = \frac{(R_1 - R_2)(X_A - R_A \tan \theta_{AB}) + X_2 R_1 - X_1 R_2}{(R_1 - R_2) \tan \theta_{AB} - (X_1 - X_2)} \\ X_Q = (R_Q - R_A) \tan \theta_{AB} + X_A \end{cases} \quad (18)$$

若满足 $R_A \leq R_Q < R_B$, 则失步中心在联络线 AB 上; 若 $R_Q \geq R_B$, 则进行下一步计算。

求式(10)与式(16)中 BN 的交点, 解得:

$$\begin{cases} R_Q = \frac{(R_1 - R_2)(X_B - R_B \tan \theta_{BN}) + X_2 R_1 - X_1 R_2}{(R_1 - R_2) \tan \theta_{BN} - (X_1 - X_2)} \\ X_Q = (R_Q - R_B) \tan \theta_{BN} + X_B \end{cases} \quad (19)$$

若满足 $R_B \leq R_Q < R_N$, 则失步中心在联络线 BN 上; 否则, 失步中心必位于 W 侧等值系统中。

综上, 当 $\rho_E = E_W/E_S = 1$ 时, 通过联立测量阻抗所在直线和折线 $SMABNW$ 求交点, 不仅能够定位失步中心所在的元件, 而且若失步中心位于线路上, 还能精确解得失步中心 Q 的坐标 $Z_Q \angle \theta_Q = R_Q + jX_Q$ 。

第二种情况: $\rho_E = E_W/E_S \neq 1$ 时, 测量阻抗轨迹 O 为式(11)所示的一个圆, 联立式(11)和(16)求交点 $Q(R_Q, X_Q)$ 。

先求式(11)与式(16)中 MA 的交点, 解得:

$$\begin{cases} R_{Q1} = (R_0 \cos \theta_{MA} + X_0 \sin \theta_{MA}) \cos \theta_{MA} + \cos \theta_{MA} \times \\ \sqrt{(R_0 \cos \theta_{MA} + X_0 \sin \theta_{MA})^2 + (R_1^2 + X_1^2 - 2R_1 R_0 - 2X_1 X_0)} \\ X_{Q1} = R_{Q1} \tan \theta_{MA} \\ R_{Q2} = (R_0 \cos \theta_{MA} + X_0 \sin \theta_{MA}) \cos \theta_{MA} - \cos \theta_{MA} \times \\ \sqrt{(R_0 \cos \theta_{MA} + X_0 \sin \theta_{MA})^2 + (R_1^2 + X_1^2 - 2R_1 R_0 - 2X_1 X_0)} \\ X_{Q2} = R_{Q2} \tan \theta_{MA} \end{cases} \quad (20)$$

由式(20)可知, 解得2个交点 Q_1 和 Q_2 , 它们的横坐标满足 $R_{Q1} > R_{Q2}$ 。如图6(a)所示, 当 $\rho_E < 1$ 时, 折线 $SMABNW$ 与圆 O 的交点只能是 Q_2 ; 当 $\rho_E > 1$ 时, 折线 $SMABNW$ 与圆 O 的交点只能是 Q_1 , 如图6(b)所示。

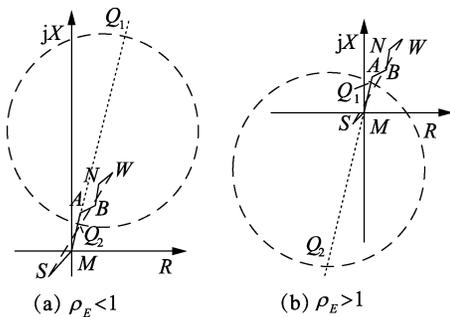


图6 线路阻抗与测量阻抗轨迹

Fig.6 Line and measured impedance locus

$\rho_E < 1$ 时, 若满足 $R_{Q2} < 0$, 则失步中心位于 S 侧等值系统中; 若满足 $0 \leq R_{Q2} < R_A$, 则失步中心在线路 MA 上; 否则进行下一步计算。 $\rho_E > 1$ 时, 若满足 $R_{Q1} < 0$, 则失步中心位于 S 侧等值系统中; 若满足 $0 \leq R_{Q1} < R_A$, 则失步中心在线路 MA 上; 否则进行下一步计算。

求式(11)与式(16)中 AB 的交点, 解得:

$$\begin{cases} R_{Q1,2} = \frac{(X_0 - X_A) \tan \theta_{AB} + R_A \tan^2 \theta_{AB} + R_0}{1 + \tan^2 \theta_{AB}} \pm \frac{1}{1 + \tan^2 \theta_{AB}} \times \\ \sqrt{[(X_0 - X_A) \tan \theta_{AB} + R_A \tan^2 \theta_{AB} + R_0]^2 - C_1 (1 + \tan^2 \theta_{AB})} \\ X_{Q1,2} = (R_{Q1,2} - R_A) \tan \theta_{AB} + X_A \end{cases} \quad (21)$$

$$C_1 = (X_A - R_A \tan \theta_{AB} - X_0)^2 - (X_0^2 + R_1^2 + X_1^2 - 2R_0 R_1 - 2X_0 X_1) \quad (22)$$

当 $\rho_E < 1$ 且满足 $R_A \leq R_{Q2} < R_B$ 时或者当 $\rho_E > 1$ 且满足 $R_A \leq R_{Q1} < R_B$ 时, 失步中心在线路 AB 上; 否则进行下一步计算。

求式(11)与式(16)中 BN 的交点, 解得:

$$\begin{cases} R_{Q1,2} = \frac{(X_0 - X_B) \tan \theta_{BN} + R_B \tan^2 \theta_{BN} + R_0}{1 + \tan^2 \theta_{BN}} \pm \frac{1}{1 + \tan^2 \theta_{BN}} \times \\ \sqrt{[(X_0 - X_B) \tan \theta_{BN} + R_B \tan^2 \theta_{BN} + R_0]^2 - C_2 (1 + \tan^2 \theta_{BN})} \\ X_{Q1,2} = (R_{Q1,2} - R_B) \tan \theta_{BN} + X_B \end{cases} \quad (23)$$

$$C_2 = (X_B - R_B \tan \theta_{BN} - X_0)^2 - (X_0^2 + R_1^2 + X_1^2 - 2R_0 R_1 - 2X_0 X_1) \quad (24)$$

当 $\rho_E < 1$ 且满足 $R_B \leq R_{Q2} < R_N$ 时或者当 $\rho_E > 1$ 且满足 $R_B \leq R_{Q1} < R_N$ 时, 失步中心在线路 BN 上; 否则失步中心必位于 W 侧等值系统中。

因此, 通过联立测量阻抗所在圆和折线 $SMABNW$ 求交点, 不仅能够定位失步中心所在元件, 而且若失步中心位于线路上, 还能精确解得失步中心 Q 的坐标 $Z_Q \angle \theta_Q = R_Q + jX_Q$ 。

本文失步中心定位方法的流程见图7。由于确认失步振荡后只用3组广域测量数据便实现了失步中心的定位, 在广域测量系统每隔10ms上传一次数据的情况下需要的时间为30ms, 所以在0.2s最短振荡周期的情况下, 也能在两侧系统电势相角差未达到 180° 时定位失步中心所在元件。

4 基于广域测量信息确定失步中心出现时刻

a. 失步中心位于线路上。

系统发生失步振荡后, 通过失步中心定位程序迅速找到了失步中心所在元件。理论上, 当该元件根据广域测量计算得到的正序测量阻抗 $Z_{1k} \angle \theta_{1k}$ (k 表示第 k 次测量) 与失步中心阻抗 $Z_Q \angle \theta_Q$ 相等, 即 $Z_{1k} \angle \theta_{1k} = Z_Q \angle \theta_Q = R_Q + jX_Q$ 时, 对应的时刻为失步中心出现时刻。但由于广域测量系统每隔10ms才上传一次数据, 难以准确地捕捉该时刻, 因此, 利用式(25)所示判据找到失步中心出现时刻。

$$\begin{cases} (\theta_{1k} - \theta_Q) (\theta_{1(k-1)} - \theta_Q) \leq 0 \\ 0 \leq R_{1k} < R_N \end{cases} \quad (25)$$

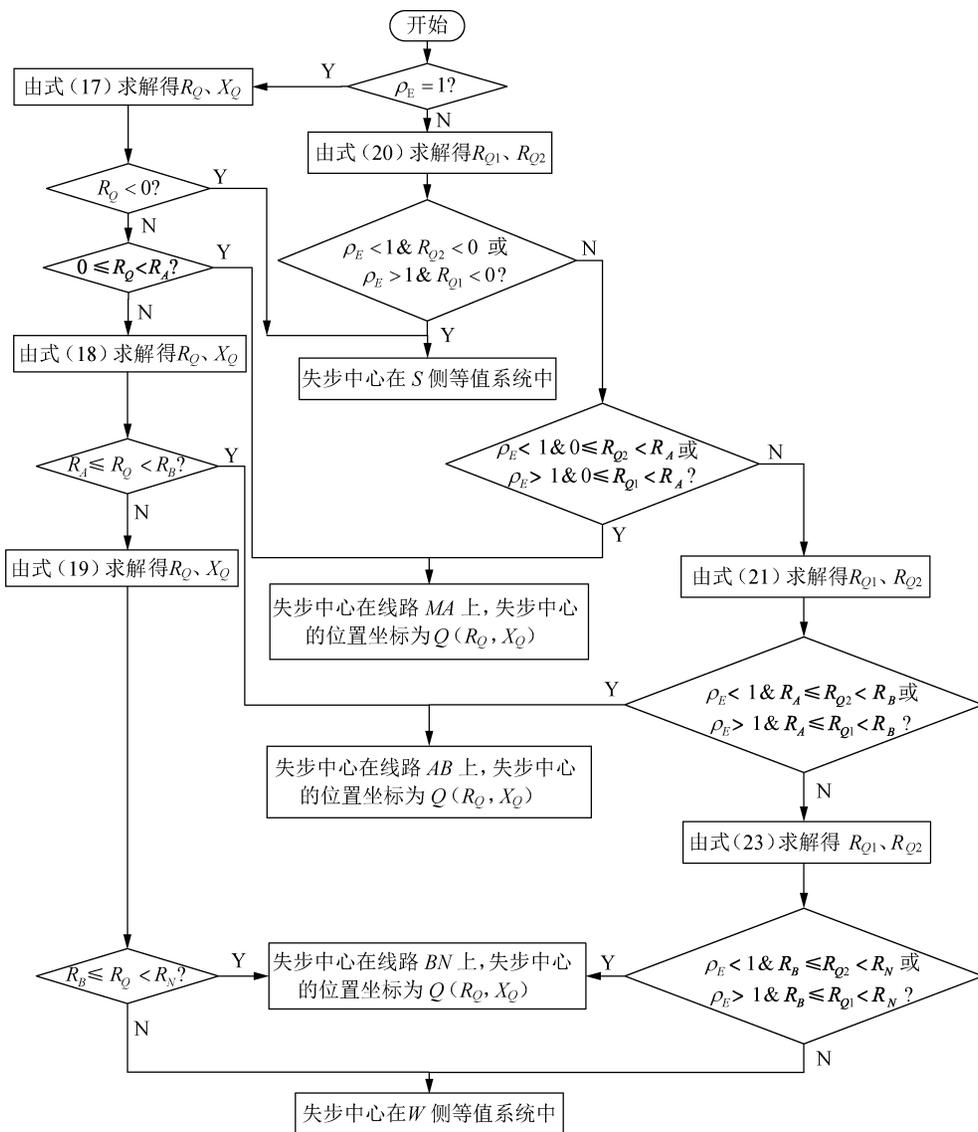


图 7 失步中心定位流程

Fig.7 Flowchart of locating out-of-step center

其中,第一个不等式意味着当前测得的 $\theta_{1k} > \theta_Q$, 而前一时刻测得的 $\theta_{1(k-1)} < \theta_Q$, 则 $\theta_{1k} = \theta_Q$ 的时刻就在这 2 个测量点之间, 如图 8 所示; 第二个不等式意味着只有当实时正序测量阻抗 $Z_{1k} (R_{1k}, X_{1k})$ 的横坐标在 $MABN$ 折线所在横坐标范围内时, 该交点才是有效交点, 从而确定了该振荡周期内失步中心出现的时刻。

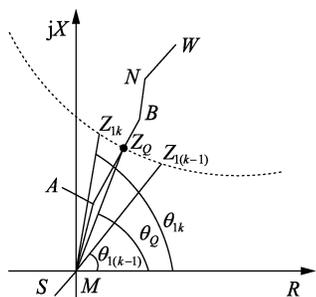


图 8 失步中心在线路上时失步中心出现时刻的确定

Fig.8 Determination of appearing time of out-of-step center when it is in line

b. 失步中心位于等值系统内。

失步中心位于 S 侧等值系统内的情况见图 9。当到达失步中心时刻时, E_S 与 U_M 的夹角为 180° 。设广域测量得到的 S 侧系统等值电势为 $E_S \angle \delta_S$ 、 S 侧系统出口母线电压为 $U_M \angle \theta_M$, 则 δ_S^k 与 θ_M^k 的相角差为 180° 对应的时刻为失步中心出现时刻。

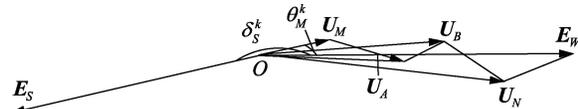


图 9 失步中心在等值系统内时失步中心出现时刻的确定

Fig.9 Determination of appearing time of out-of-step center when it is in equivalent system

因此, 利用式(26)所示判据找到失步中心出现时刻。

$$(\delta_S^k - \theta_M^k - 180^\circ)(\delta_S^{k-1} - \theta_M^{k-1} - 180^\circ) \leq 0 \quad (26)$$

式(26)表示当前测得的 $\delta_S^k - \theta_M^k > 180^\circ$, 而前一时

刻测得的 $\delta_s^{k-1} - \theta_M^{k-1} < 180^\circ$, 则 $\delta_s^k - \theta_M^k = 180^\circ$ 的时刻就在这 2 个测量点之间。

对于包含多个电源的复杂电力系统, 失步后会出现多机群振荡模式^[16-19]。本文提出的失步中心定位方法和确定失步中心出现时刻的判据能在每一种由两等值系统和联络线构成的失步振荡模式中快速定位失步中心及出现时刻, 从而为复杂电力系统失步解列断面的确定和解列时刻的选择提供依据。

5 仿真算例

基于 MATLAB/Simulink 搭建图 10 所示的 3 机系统仿真模型。图中, 系统 S_1 的电压 $E_1 = 500$ kV, 初相角为 20° , $X/R = 8$; 系统 S_2 电压 $E_2 = 475$ kV, 初相角为 10° , $X/R = 7$; 系统 S_3 电压 $E_3 = 475$ kV, 初相角为 0° , $X/R = 8$ 。线路 AB 和 EF 为双回线, 参数为 $r_d = 0.026 \Omega/\text{km}$, $l_d = 0.888 \text{ mH}/\text{km}$, $c_d = 12.10 \text{ nF}/\text{km}$; 其余线路均为单回线, 参数为 $r_s = 0.013 \Omega/\text{km}$, $l_s = 0.869 \text{ mH}/\text{km}$, $c_s = 13.21 \text{ nF}/\text{km}$ 。系统额定频率均为 50 Hz。通过编程实现 S_1 、 S_3 的频率随时间变化: S_1 的频率从 1 s 开始以 $1 \text{ Hz}/\text{s}$ 的速度增大; S_3 的频率从 1 s 开始以 $0.5 \text{ Hz}/\text{s}$ 的速度增大, 仿真时长为 5 s。线路 AB 母线 A 处 A 相的振荡电压和电流如图 11 所示。

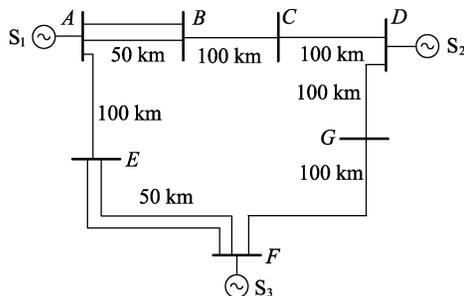


图 10 3 机系统模型

Fig.10 Model of three-machine system

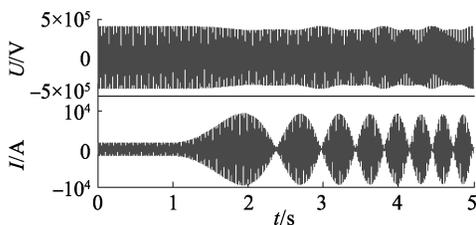


图 11 振荡电压和电流

Fig.11 Oscillation voltage and current

a. 失步振荡识别判据的验证。

母线 A 、 D 电压相角差 θ_{AD} 和幅值 U_{AD} 的变化如图 12(a) 所示。 $\theta_{AD} = 120^\circ$ 的时刻出现在 $1.79 \sim 1.80$ s 之间, 1.80 s 时 $U_{AD} = 1.279 \times 10^6$ V。从 1.80 s 开始 $\theta_{AD} > 120^\circ$, 1.81 s 和 1.82 s 对应的 U_{AD} 的值分别为 1.291×10^6 V 和 1.313×10^6 V, 连续 3 组测量数据满

足式(7), 判定系统 S_1 和 S_2 之间发生失步振荡。同理, 母线 A 、 F 电压相角差 θ_{AF} 和幅值 U_{AF} 的变化如图 12(b) 所示, 通过母线 A 、 F 电压差幅值在 2.12 s、 2.13 s 和 2.14 s 的连续 3 组测量数据判定系统 S_1 和 S_3 之间发生失步振荡; 母线 F 、 D 电压相角差 θ_{FD} 和幅值 U_{FD} 的变化如图 12(c) 所示, 通过母线 F 、 D 电压差幅值在 2.10 s、 2.11 s 和 2.12 s 的连续 3 组测量数据也判定系统 S_2 和 S_3 之间发生失步振荡。因此, 本文所提判据可以有效地判定系统发生失步振荡。

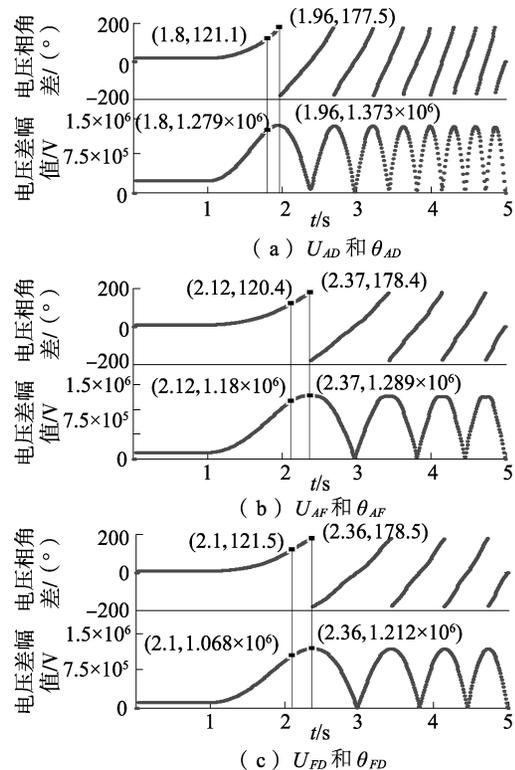


图 12 失步振荡识别

Fig.12 Identification of asynchronous oscillation

b. 失步中心定位方法的验证。

对于系统 S_1 、 S_2 , 取失步振荡后线路 AB 母线 A 处 3 组测量电压、电流所得 3 个正序测量阻抗坐标为 $(25.845 0 \Omega, 35.950 5 \Omega)$ 、 $(23.400 9 \Omega, 36.038 7 \Omega)$ 、 $(21.015 5 \Omega, 36.132 0 \Omega)$, 利用式(12) 计算得到测量阻抗圆的圆心为 $(51.923 4 \Omega, 795.960 1 \Omega)$, 半径为 $760.456 5 \Omega$ 。利用文献[13] 中的方法计算得到的阻抗圆的圆心为 $(52.523 0 \Omega, 793.488 1 \Omega)$, 半径为 $758.062 3 \Omega$ 。对于系统 S_1 和 S_3 而言, 取失步振荡后线路 AE 母线 A 处 3 组测量电压和电流得到的 3 个正序测量阻抗, 利用式(12) 计算得到圆心为 $(37.936 7 \Omega, 505.522 1 \Omega)$, 半径为 $483.805 4 \Omega$ 。利用文献[13] 方法计算得到的阻抗圆轨迹圆心为 $(36.144 0 \Omega, 503.854 9 \Omega)$, 半径为 $482.491 8 \Omega$ 。对于系统 S_2 和 S_3 , 由于两侧等值电势幅值相等, 失步振荡后的测量阻抗轨迹为一条直线。取失步振荡后线路 FG 母线 F 处 3 组测量电压和电流得到的 3

个正序测量阻抗,利用式(9)计算得到该直线斜率为 -0.0631 。利用文献[13]中方法计算得到的斜率为 -0.0632 ,本文算法的计算结果与理论计算结果能够很好地吻合。

利用本文定位方法计算失步中心的精确位置。对于系统 S_1 和 S_2 之间,将振荡后线路 AB 母线 A 处测得的3组测量阻抗值代入式(20)计算得到 $R_{Q2}=3.4506\ \Omega$,交点横坐标大于 $R_B=1.3\ \Omega$,故失步中心既不在 S_1 侧等值系统内也不在线路 AB 上;再将3组测量阻抗值代入式(21)计算得到 $R_{Q2}=2.3785\ \Omega$,此时满足 $R_B < R_{Q2} < R_C$,失步中心位于线路 BC 上,且距离母线 B 出口 $83.08\ \text{km}$ 处。同理,算得系统 S_1 和 S_3 之间失步中心位于线路 AE 上,距离母线 A 出口 $84.62\ \text{km}$ 处;计算得到系统 S_2 和 S_3 之间失步中心位于线路 FG 上,距离母线 F 出口 $86.53\ \text{km}$ 处。利用文献[11]的方法得到的振荡中心位置变化曲线见图13(图13(a)、(b)中振荡中心位置指振荡中心距离母线 A 的距离,图13(c)中振荡中心位置指振荡中心距离母线 F 的距离)。系统 S_1 和 S_2 之间,第一个失步中心约在 $t=1.96\ \text{s}$ 时出现于线路 BC 上,距离母线 B 出口 $84.01\ \text{km}$ 。系统 S_1 和 S_3 之间,第一个失步中心约在 $t=2.37\ \text{s}$ 时出现于线路 AE 上,距离母线 A 出口 $84.37\ \text{km}$ 处。系统 S_2 和 S_3 之间,第一个失步中心约在 $t=2.36\ \text{s}$ 时出现于线路 FG 上,距离母线 F 出口 $86.67\ \text{km}$ 处。综上,本文计算结果与文献[11]计算结果吻合。

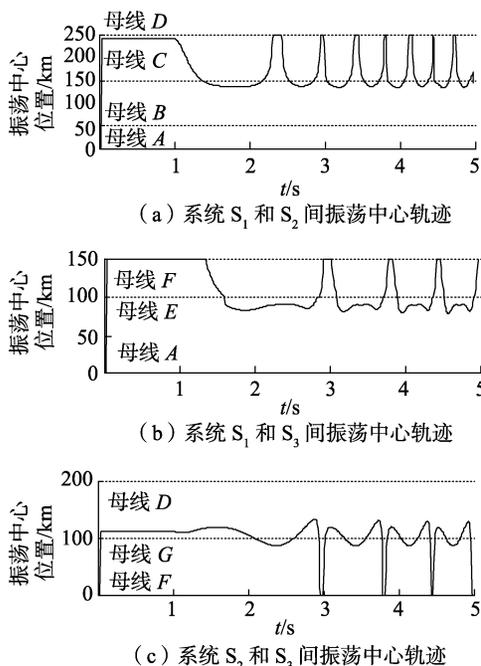


图13 振荡中心变化轨迹

Fig.13 Change trajectory of oscillation centre

6 结论

a. 通过快速捕捉系统频率对全波傅里叶算法进

行修正得到的变窗长傅里叶算法有效地提高了相量计算精度,适用于广域测量系统的相量计算;

b. 本文提出了一种电力系统振荡识别方法和一种失步中心快速定位的新方法,能够依据广域测量数据在第一次失步中心到来之前定位失步中心的位置;

c. 通过实时监测广域测量数据能确定失步中心出现的时刻,为实现电力系统的快速解列奠定了基础。

参考文献:

- [1] 李莉. 基于广域测量信息的失步解列判据与控制方案研究[D]. 济南:山东大学,2009.
LI Li. Studies on out-of-step splitting criterion and control scheme based on wide area measurements[D]. Ji'nan: Shandong University, 2009.
- [2] MASSOUD A. Energy infrastructure defense systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 861-875.
- [3] 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.
- [4] 丛伟,潘彦存,肖静,等. 电力系统振荡解列原理的分析与研究[J]. 继电器, 2003, 31(10): 51-55.
CONG Wei, PAN Zhencun, XIAO Jing, et al. The study and analysis of power swing and grid islanding[J]. Relay, 2003, 31(10): 51-55.
- [5] 张保会,张毅刚,刘海涛. 基于本地量的振荡解列装置原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 67-72.
ZHANG Baohui, ZHANG Yigang, LIU Haitao. Study on principle of power system separation device based on local electrical parameter[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 67-72.
- [6] 崔家佩,孟庆炎,陈永芳,等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M]. 北京:中国电力出版社,1993:3.
- [7] 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. An 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.
- [8] 黄少锋,吴麟琳. 基于电气量频率差异的电力系统振荡识别[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 18-22.
HUANG Shaofeng, WU Linlin. Power system oscillation identification based on frequency differences between electrical data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 18-22.
- [9] 吴麟琳,黄少锋. 基于频率特征的失步解列判据原理[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 18-22.
WU Linlin, HUANG Shaofeng. Out-of-step oscillation criterion based on frequency characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 18-22.
- [10] 张艳霞,蒙高鹏,赵冉,等. 复杂场景下失步中心定位及振荡中心漂移规律[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2264-2269.
ZHANG Yanxia, MENG Gaopeng, ZHAO Ran, et al. Locating of out-of-step centre and mechanism of oscillation centre migrating under complicated scenes[J]. Power System Technology, 2015, 39

- (8);2264-2269.
- [11] 刘志雄,张艳霞,冯康恒,等. 基于广域信息跟踪电力系统振荡中心的方法及应用[J]. 电网技术,2014,38(6):1694-1699.
LIU Zhixiong,ZHANG Yanxia,FENG Kangheng, et al. A method of tracking power system's oscillation center based on wide area information and its application[J]. Power System Technology,2014,38(6):1694-1699.
- [12] 杨玉倩. 基于广域信息的电网失步振荡中心定位[D]. 保定:华北电力大学,2014.
YANG Yuqian. The location of out-of-step oscillation center based on wide area measurements [D]. Baoding: North China Electric Power University,2014.
- [13] 张艳霞,姜惠兰. 电力系统保护与控制[M]. 北京:科学出版社,2010:62-66.
- [14] 李丹,韩福坤,郭子明,等. 华北电网广域实时动态监测系统[J]. 电网技术,2004,28(23):52-56.
LI Dan,HAN Fukun,GUO Ziming, et al. Wide area real time dynamic security monitoring system of North China Power Grid[J]. Power System Technology,2004,28(23):52-56.
- [15] 杨贵玉. 电力系统“广域同步相量测量”中几个关键问题的研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
YANG Yugui. Research on some key problem of wide area synchronized phasor measurements of power systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2004.
- [16] 张保会,汪成根,郝治国. 电力系统失步解列存在的问题及需要开展的研究[J]. 电力自动化设备,2010,30(10):1-6.
ZHANG Baohui,WANG Chenggen,HAO Zhiguo. Problems and solutions of power system out-of-step islanding [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(10):1-6.
- [17] 刘福锁,方勇杰,吴雪莲,等. 导致振荡中心迁移的基本因素及其敏感性分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(6):1695-1701.
LIU Fusuo,FANG Yongjie,WU Xuelian, et al. Basic factors leading to the migration of the oscillation center and its sensitivity[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(6):1695-1701.
- [18] 陈恩泽,唐飞,刘涤尘,等. 振荡中心迁移下的电网失步解列策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3799-3805.
CHEN Enze,TANG Fei,LIU Dichen, et al. Splitting strategy of power systems based on migration of oscillation center[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(22):3799-3805.
- [19] 冯康恒,张艳霞,刘志雄,等. 考虑振荡中心漂移的解列新方案[J]. 电网技术,2015,39(4):1082-1087.
FENG Kangheng,ZHANG Yanxia,LIU Zhixiong, et al. A new scheme for out-of-step splitting considering drift of oscillation center [J]. Power System Technology,2015,39(4):1082-1087.

作者简介:



张艳霞

张艳霞(1962—),女,天津人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统继电保护及失步解列控制策略等(E-mail: zyx1962@tju.edu.cn);

李杰(1990—),男,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为电力系统振荡及广域保护。

Fast locating method of out-of-step center based on wide area measurement information

ZHANG Yanxia, LI Jie, ZHANG Shuai, LI Duoduo, YIN Jiaxin

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A phasor algorithm which can reduce the effect of system frequency deviation is studied. An out-of-step oscillation identification method based on bus voltage and a new fast out-of-step center locating method are proposed. In the scene that both the voltage amplitude of the two sides of the system is different and the whole system impedance angle is different, the proposed methods can locate the component where the out-of-step center belongs to when the out-of-step oscillation occurs and the phase difference of the two sides of the system is not up to 180° , by solving the intersection of measured impedance trajectory equation and the whole system impedance poly line equation, according to three groups of voltage and current data uploaded by wide area measurement system. The appearing time of out-of-step center is determined by the relationship between real-time measured data and the theoretical calculative value, so as to provide the basis for the determination of the out-of-step separation section and the selection of separation time for complex power system. Simulative results verify the effectiveness of the proposed methods.

Key words: out-of-step separation; frequency deviation; phasor algorithm; wide area measurement; out-of-step oscillation identification; out-of-step center locating