

# 测量阻抗的振荡轨迹识别

黄少锋<sup>1</sup>, 申洪明<sup>1</sup>, 赵远<sup>2</sup>, 费彬<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 国网北京市电力公司昌平供电公司, 北京 102200)

**摘要:** 振荡是电力系统中一种严重的异常运行状态, 容易引起距离保护的误动, 而振荡轨迹的识别是研究振荡对距离保护影响的理论基础, 经典的振荡轨迹分析一般是基于系统两侧电势幅值相等的假定条件进行的。所提方法不进行任何假设, 基于测量阻抗的数学解析式, 对测量阻抗的振荡轨迹进行了详细推导。推导结果显示, 在任意系统阻抗角下, 系统两侧电势不等时振荡轨迹为圆, 并确定了振荡圆心和半径。PSCAD/EMTDC 仿真验证了所提方法的正确性。

**关键词:** 系统振荡; 继电保护; 测量阻抗; 振荡轨迹; 电势幅值

**中图分类号:** TM 77

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.06.012

## 0 引言

电力系统中的很多扰动, 比如电力系统故障、负荷的突然变动、输电线路的切换等都可能造成系统振荡。系统振荡是一种严重的不正常运行状态, 而不是故障状态。但是振荡时电流、电压不断发生变化, 造成了测量阻抗很可能落入距离保护的動作区内而引起保护的误动作<sup>[1-2]</sup>。因此现阶段继电保护中有关振荡问题的研究主要集中在振荡与故障的识别以及振荡轨迹的研究 2 个方面<sup>[3-15]</sup>。

文献[3-5]分别提出了不同的识别系统振荡模式的方法; 文献[6]分析了三相故障距离继电器在系统振荡及振荡中再故障时的动作性能; 文献[7]利用广域相量测量技术提出了一种根据系统实时参数自适应调整保护动作门槛值的新算法, 该算法能识别振荡中再发生的各种故障; 文献[8]基于小波变化以及神经网络的优点, 构建了一种新型的小波神经网络模型, 该小波网络能够正确、快速识别振荡和各种故障情况; 文献[9]提出了一种用级联多分辨率形态梯度变化(SMMG)的方法识别振荡中的故障和改进的故障选相方案; 文献[10]提出了一种基于阻抗变化率的适用于振荡的新型选相方法; 文献[11]提出了一种基于  $U \cos \varphi$  波形特征快速识别振荡和对称性故障的方法; 文献[12]提出了一种通过电阻元件检测振荡速度实时改变三相故障解锁判据延时的方法; 文献[13]提出了一种基于小波变换识别振荡、故障、振荡中再故障的新方法; 文献[14]基于振荡中心

电压频率和电流频率是否相等, 提出了一种基于电气量频率差异的振荡识别方法; 文献[15]基于电压频率的特征提出了一种不受系统结构变化和运行方式变化影响的区分同步振荡和失步振荡的方法。上述文献集中分析振荡和短路识别的问题, 但对于振荡轨迹这一基础问题却研究不足。

经典的振荡轨迹分析方法一般都是基于系统两侧电势幅值相等这一假设条件进行分析的。有时为了方便地确定振荡中心的位置, 还会假定系统各元件阻抗角相同<sup>[1]</sup>。文献[16]提出了两侧电势不等情况下测量阻抗的振荡轨迹, 结果表明: 当两侧电势幅值不等时, 振荡轨迹为圆; 两侧电势幅值相等时是圆半径为无穷大和中心无穷大偏移的特殊情况。但文中对轨迹的分析不够详实, 而且理论推导过程比较复杂, 不易掌握。

本文提出了一种全新的分析方法, 即不考虑上述假设条件, 对两侧电势幅值不等和阻抗角任意的情况进行了分析, 得出了两侧电势幅值不等、相角任意时测量阻抗的振荡轨迹, 同时在阻抗平面上确定了振荡轨迹的圆心与半径, 并对 2 种分析方法进行了比较。由于本文的分析方法没有运用到假设条件, 所以分析结果更具参考价值和应用价值。

## 1 传统的振荡轨迹分析方法

图 1 为双电源系统。图中,  $Z_M$  为保护安装处背后的系统阻抗;  $Z_L$  为线路阻抗;  $Z_N$  为系统综合阻抗, 对应于图 1 中的全部阻抗值之和, 即  $Z_N = Z_M + Z_L + Z_L$ 。

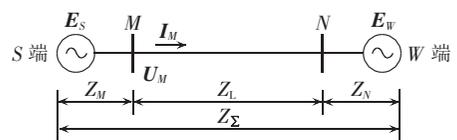


图 1 系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of power system

收稿日期: 2014-09-17; 修回日期: 2015-04-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012CB215206); 中央高校基本科研业务专项基金资助项目(2015XS16)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2012CB215206) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2015XS16)

在进行振荡轨迹的分析时,为了方便地给出具有一定指导意义的结论和简洁的公式,通常引入以下假设条件:

$$|E_S| = |E_W| = E, E_S \wedge E_W = \delta$$

其中,  $\delta$  为  $E_S$  和  $E_W$  间的相位差。

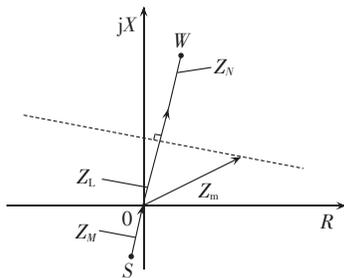
在上述假设条件下,文献[1]推导了振荡时  $M$  处测量阻抗轨迹的经典公式如下:

$$Z_m = \left( \frac{1}{2} - \rho_M \right) - j \frac{Z_\Sigma}{2} \cot \frac{\delta}{2} \quad (1)$$

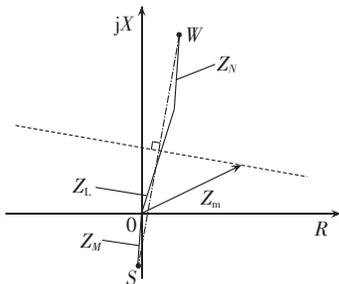
其中,  $\rho_M = Z_M / Z_\Sigma$ 。

通常为了更加简便地分析振荡中心的位置,还会引入一假设条件,即全系统阻抗角相同。在此假设条件下,振荡中心的位置位于全阻抗中心  $Z_\Sigma / 2$  处。

在传统的假设条件下,其振荡轨迹如图 2 中虚线所示。由图 2(a)、(b)的对比可以看出,系统阻抗角是否相同,会影响振荡轨迹的具体位置,但不会影响到振荡轨迹的形状。



(a) 阻抗角相等时的振荡轨迹



(b) 阻抗角不等时的振荡轨迹

图 2 测量阻抗的振荡轨迹

Fig.2 Oscillation trajectory of measured impedance

## 2 本文振荡轨迹分析方法

为了方便叙述,将图 1 等效为图 3 所表示的电路图,且设:

$$E_S = \frac{1}{m} e^{j\delta} E_W \quad (2)$$

则保护安装处  $M$  的测量阻抗为:



图 3 等效电路图

Fig.3 Diagram of equivalent circuit

$$Z_m = \left( E_S - \frac{E_S - E_W}{Z_\Sigma} Z_M \right) / \frac{E_S - E_W}{Z_\Sigma} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)可得:

$$Z_m = \frac{Z_\Sigma}{1 - m e^{-j\delta}} - Z_M \quad (4)$$

对式(4)进一步整理可得:

$$m e^{-j\delta} = \frac{Z_m + Z_M - Z_\Sigma}{Z_m + Z_M} \quad (5)$$

由于  $Z_m$  是复数,可以将其表示为:  $Z_m = a + jb$ , 其中,  $a$  表示实部,  $b$  表示虚部。令  $Z_\Sigma = R_\Sigma + jX_\Sigma$ ,  $Z_M = R_M + jX_M$ 。

需要注意的是,上述推导过程并不要求系统各元件的阻抗角相同,即  $\arctan(X_\Sigma / R_\Sigma)$ ,  $\arctan(X_N / R_N)$ ,  $\arctan(X_L / R_L)$  与  $\arctan(X_M / R_M)$  可为任意值。

将  $Z_m$ ,  $Z_\Sigma$ ,  $Z_M$  代入式(5)可得:

$$m e^{-j\delta} = \frac{(a + R_M - R_\Sigma) + j(b + X_M - X_\Sigma)}{a + R_M + j(b + X_M)} \quad (6)$$

对式(6)两边取模值:

$$m = \frac{\sqrt{(a + R_M - R_\Sigma)^2 + (b + X_M - X_\Sigma)^2}}{\sqrt{(a + R_M)^2 + (b + X_M)^2}} \quad (7)$$

### 2.1 $m = 1$ 时的振荡轨迹分析

当  $m = 1$  时,式(7)可以化简为:

$$b = \frac{Z_\Sigma^2 - 2X_\Sigma X_M - 2R_\Sigma R_M - 2aR_\Sigma}{2X_\Sigma} \quad (8)$$

在  $Z_M$ ,  $Z_\Sigma$  一定的情况下,式(8)所表示的轨迹为一条直线,如图 4 中虚线所示。图 4 中实线表示的是式(1)所形成的曲线。通过 2 条曲线的比较可以看出,当两侧电势幅值相同时,2 种分析方法所得的振荡轨迹相同。

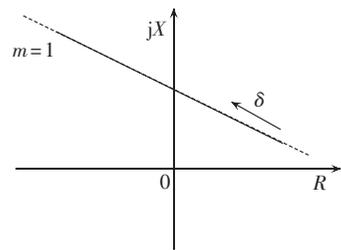


图 4  $m = 1$  时的振荡轨迹

Fig.4 Oscillation trajectory when  $m = 1$

### 2.2 $m \neq 1$ 时的振荡轨迹分析

当  $m \neq 1$  时,对式(7)等式两边平方并化简可得:

$$\left[ a + \frac{(m^2 - 1)R_M + R_\Sigma}{m^2 - 1} \right]^2 + \left[ b + \frac{(m^2 - 1)X_M + X_\Sigma}{m^2 - 1} \right]^2 = \frac{m^2 Z_\Sigma^2}{(m^2 - 1)^2} \quad (9)$$

显然,在  $a$ ,  $b$  为变量时,式(9)是一个标准的圆方程。

因此,通过上面的分析可以得出以下结论:

a. 当  $m = 1$  时,振荡轨迹是一条直线,见图 4。

b. 当  $m \neq 1$  时, 振荡轨迹为圆, 并且振荡轨迹的圆心为  $(\frac{(m^2-1)R_M+R_\Sigma}{1-m^2}, \frac{(m^2-1)X_M+X_\Sigma}{1-m^2})$ , 半径  $r = |Z_\Sigma m / (1-m^2)|$ 。

c. 当  $m < 1$  时, 振荡圆心处于复平面的第一象限, 振荡轨迹如图 5 中虚线所示; 当  $m > 1$  时, 振荡圆心处于复平面的第三象限, 振荡轨迹如图 5 中实线所示。

需要指出的是, 上述推导过程中对系统阻抗角并无要求, 因此推导得出的结论无论阻抗角是否相同都成立。

为验证推导过程的正确性, 在  $Z_\Sigma = 2 + j16 \Omega$ ,  $Z_M = 0.8 + j3 \Omega$ ,  $m = 1/1.1$  的情况下, 利用 MATLAB 画出式(4)所表示的轨迹, 如图 6(a)所示。由图 6(a)可以得出, 此时振荡轨迹的圆心为 (10.72, 89.19), 半径为 84.46, 这与理论计算结果相仿, 因此可以说明上述推导的结果是可信的。需要指出的是, 当系统振荡时, 如果两侧功角不能摆到  $360^\circ$ , 那么其振荡轨迹是一个圆弧, 见图 6(b)。

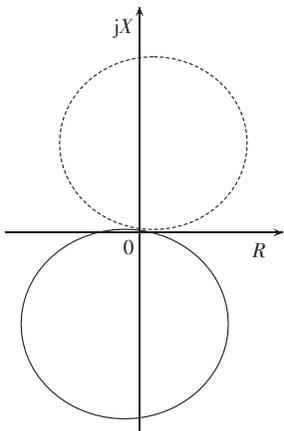


图 5  $m \neq 1$  时的振荡轨迹  
Fig.5 Oscillation trajectory when  $m \neq 1$

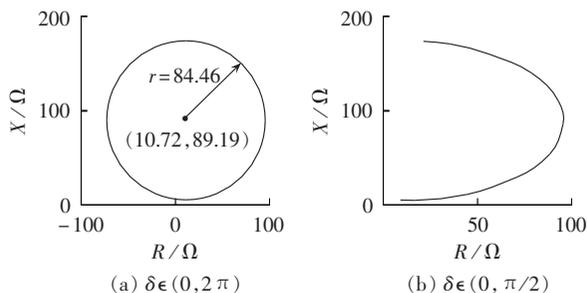


图 6 振荡轨迹示意图

Fig.6 Schematic diagram of oscillation trajectory

### 2.3 2 种分析方法的对比

分析振荡轨迹是为了发现距离保护是否受振荡的影响。图 7 为在不同参数下本文方法和传统方法得到的局部放大的振荡轨迹与阻抗方向圆之间的关系, 其中方向圆的直径取为线路全长的 1.1 倍。

由图 7 中虚线椭圆中的轨迹可知, 在分析距离保护是否受振荡影响的局部轨迹中, 本文方法和传统方法得到的 2 种轨迹相差不大, 所以 2 种方法得到的结论也大致相仿, 如图 7(a)所示, 2 种方法得到轨迹都不受振荡的影响, 因此传统的分析方法在大部分情况下是满足工程需要的。但在某些情形下, 如图 7(b)所示, 利用本文分析方法得到的轨迹不受振荡的影响, 而传统的分析方法得到的结论是受影响的, 此时 2 种方法得到的结论相悖。因此传统分析

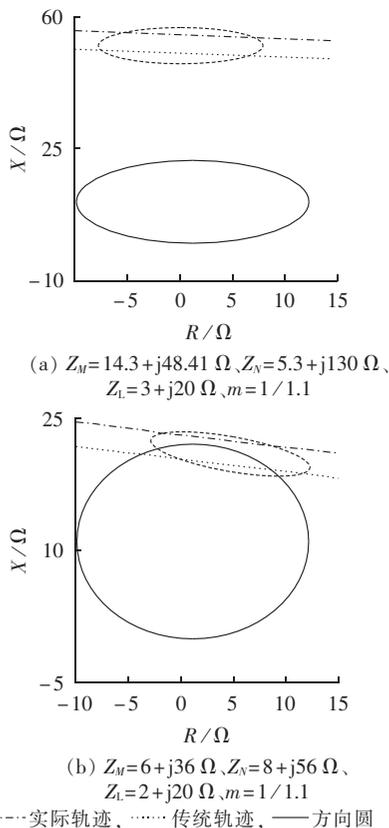


图 7 振荡轨迹与方向圆之间的关系  
Fig.7 Relationship between oscillation trajectory and directional round

方法虽然具有较强的工程价值, 但其假设条件还是对分析得到的结论产生了一定的影响, 而本文的轨迹分析方法更具有理论指导意义。

### 3 仿真实证

仿真系统采用图 1 所示双电源系统, 电压等级为 220 kV, 系统参数中,  $Z_{M1} = 2.42 + j24.91 \Omega$ ,  $Z_{N1} = 2.18 + j24.91 \Omega$ ,  $Z_{M0} = j8.25 \Omega$ ,  $Z_{N0} = j8.02 \Omega$ ; 线路参数中, 线路全长 200 km,  $Z_{L1} = 0.0376 + j0.4234 \Omega/\text{km}$ ,  $Z_{L0} = 0.3010 + j1.2702 \Omega/\text{km}$ ; 下标 1、0 分别表示正序和零序。振荡周期为 1.5 s, 采用全周傅氏算法对保护安装处测量阻抗进行计算。

图 8 为系统两侧电势幅值比  $k = 0.97$  时的电压、

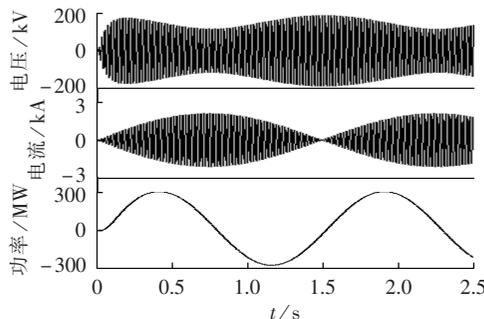


图 8 电压、电流和功率曲线

Fig.8 Curve of voltage, current and active power

电流和功率波形,由图8的波形可以看出此时系统发生了振荡。

图9(a)、(b)分别给出了 $k=0.97$ 和 $k=1.03$ 时测量阻抗的计算结果,图中同时绘出了测量阻抗的理

论值。

表1为测量阻抗的理论值与计算值比较的结果,定义圆心相对误差为实测圆心与理论圆心之间的距离相对理论半径的百分比。

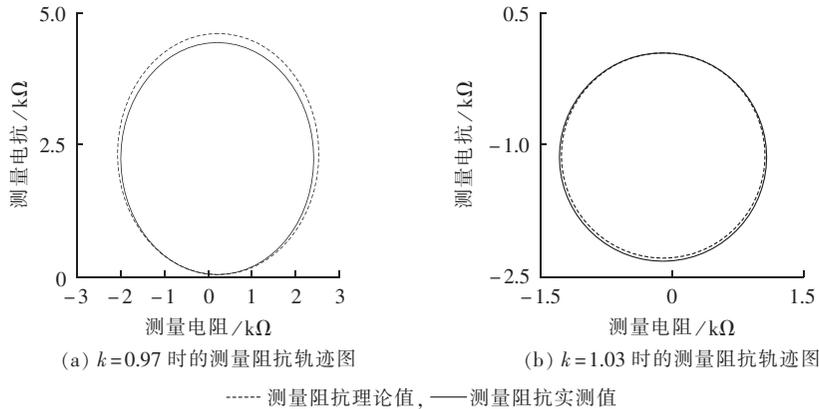


图9 测量阻抗轨迹

Fig.9 Trajectory of measured impedance

表1 测量阻抗轨迹的圆心和半径的理论值与测量值的比较

Table 1 Comparison between theoretical and measured centers and radius of measured impedance trajectory

$k$	半径			圆心		
	实测值	理论值	相对误差/%	实测值	理论值	相对误差/%
0.97	2204.1	2283.7	3.49	(175.5, 2236.7)	(206.6, 2318.0)	3.81
1.03	1177.6	1158.1	1.68	(-101.2, -1132.2)	(-100.5, -1113.1)	1.65

由表1数据可见,电力系统发生振荡时,测量阻抗轨迹近似为一标准圆。仿真过程未采取即时跟踪的算法,考虑振荡中由系统两侧电动势幅值和频率波动引起的误差后,认为仿真结果与理论值相符合。

## 4 结论

两侧电势幅值的大小会影响到保护安装处的振荡轨迹:当系统两侧电势幅值相等时,振荡轨迹为一条直线,而两侧幅值不等时振荡轨迹为一个圆或者圆弧。系统阻抗角是否相同只会影响到振荡中心的位置,并不会对振荡轨迹的形状产生影响。传统的分析方法具有较强的工程价值,但由于假设条件的应用降低了其理论指导意义。本文的分析方法不需要任何假设条件,具有较强的理论指导作用,而且方法简单,也具备较强的工程实用价值。

## 参考文献:

[1] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2005:106-113.  
 [2] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京:中国电力出版社,2005:221-255.  
 [3] 马静,彭明法,王彤,等. 故障系统低频振荡特征值分析方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):13-19.  
 MA Jing, PENG Mingfa, WANG Tong, et al. Analysis methods for low-frequency oscillation eigenvalue of faulty system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 13-19.

[4] 潘学萍,扈卫卫,尚霏. 多信号模态参数识别的小波方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):31-36.  
 PAN Xueping, HU Weiwei, SHANG Fei. Wavelet analysis based modal parameter identification from multiple signals[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 31-36.  
 [5] 马静,彭明法,王彤,等. 基于二阶摄动理论的不确定系统小干扰稳定分析方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):117-121.  
 MA Jing, PENG Mingfa, WANG Tong, et al. Small signal stability analysis based on second order perturbation theory for uncertain power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 117-121.  
 [6] 江清楷,黄少锋,刘琳,等. 电力系统振荡对三相故障距离继电器影响的分析及对策[J]. 电力自动化设备,2012,32(2):85-89.  
 JIANG Qingkai, HUANG Shaofeng, LIU Lin, et al. Impact of power system oscillation on three-phase fault distance relay and countermeasure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 85-89.  
 [7] 鲁文军,林湘宁,黄晓波,等. 一种采用浮动门槛的自适应突变量距离保护方案[J]. 电工技术学报,2009,24(6):160-166.  
 LU Wenjun, LIN Xiangning, HUANG Xiaobo, et al. A scheme of adaptive fault component distance protection using float threshold[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 160-166.  
 [8] 毛鹏,张兆宁,林湘宁,等. 基于小波神经网络的电力系统振荡和故障识别[J]. 电力系统自动化,2002,26(11):9-15.  
 MAO Peng, ZHANG Zhaoning, LIN Xiangning, et al. Wavelet neural networks based recognition of swing and fault in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(11): 9-15.  
 [9] 思为国,章耀耀,钱国明,等. 振荡中故障选相元件的研究[J]. 电

- 力自动化设备,2010,30(3):68-70.
- SI Weiguo,ZHANG Yaoyao,QIAN Guoming,et al. Faulty phase selector during power swing[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(3):68-70.
- [10] 林湘宁,吴科成,翁汉琍,等. 在功率变化交叉闭锁振荡中对称故障的快速识别方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(16):21-26.
- LIN Xiangning,WU Kecheng,WENG Hanli,et al. A novel method to rapidly identify the symmetrical fault occurring during power swings based on the cross blocking scheme using power change rate[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(16):21-26.
- [11] 邵震宇,田伟,鲁雅斌. 一种振荡中对称性故障的快速识别方法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(22):68-72.
- SHAO Zhenyu,TIAN Wei,LU Yabin. A new method to rapidly identify the symmetrical fault occurring during power swings[J]. Power System Protection and Control,2011,39(22):68-72.
- [12] 李小滨,刘凯,陈巨升,等. 系统振荡时距离保护的对策[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(3):86-90.
- LI Xiaobin,LIU Kai,CHEN Jusheng,et al. Scheme of the distance protection to avoid mal-operation in swing[J]. Power System Protection and Control,2010,38(3):86-90.
- [13] 陈皓. 小波变换原理识别电力系统故障及振荡中短路的研究[J]. 电力自动化设备,2000,20(5):18-20.
- CHEN Hao. Study on discrimination between fault and power swing based on wavelet transform[J]. Electric Power Automation Equipment,2000,20(5):18-20.
- [14] 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.
- [15] 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,33(1):18-22.
- [16] CLARKE E. Impedance seen by relays during power swing with and without faults[J]. Electrical Engineering,1945,64(6):372-384.

#### 作者简介:



黄少锋

黄少锋(1958—),男,福建福州人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统保护与控制;

申洪明(1988—),男,山东潍坊人,博士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:shen198806@126.com);

赵远(1989—),男,北京人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护;

费彬(1989—),男,浙江湖州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护。

## Recognition of oscillation trajectory for measured impedance

HUANG Shaofeng<sup>1</sup>, SHEN Hongming<sup>1</sup>, ZHAO Yuan<sup>2</sup>, FEI Bin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Changping Electric Power Company, Beijing 102200, China)

**Abstract:** Power oscillation is a seriously abnormal operating state of power system, which may easily cause the misoperation of distance protection. The oscillation trajectory recognition is the theoretical basis for studying the effect of power oscillation on the distance protection and the classic oscillation trajectory analysis is normally based on the assumption that the potential amplitudes at both system sides are equal. Without any assumption, a method based on the analysis formula of measured impedance is proposed to deduce its oscillation trajectory. Analysis results show that, the oscillation trajectory is a circle with determined center and radius when the potential amplitudes at both system sides are unequal for any system impedance angle. The correctness of the proposed method is verified by PSCAD/EMTDC simulation.

**Key words:** power oscillation; relay protection; measured impedance; oscillation trajectory; potential amplitude