

## 基于瞬时频率的保护用振荡建模新方法

许明, 高厚磊, 邹贵彬, 侯梅毅

(山东大学电气工程学院, 山东省济南市 250061)

**摘要:** 现有振荡模型的建立都是通过改变“0-t 时间段的平均频率”来实现,不能直接反映系统的实际运行状态。为解决该问题,提出了一种基于瞬时频率的振荡建模新方法,通过对瞬时频率的变化在约束条件下进行拟合,能准确地仿真出实际系统的振荡过程,不受“0-t 时间段平均频率”的束缚。利用该方法,建立了一种全过程振荡模型,通过 MATLAB 中的电力系统仿真软件包 PSB 对其振荡以及振荡中发生故障的情况进行了仿真。仿真结果表明,该模型可以准确反映预先设置的频率变化规律,非常适合于继电保护的研究。

**关键词:** 振荡模型; 瞬时频率; 继电保护

**中图分类号:** TM77

### 0 引言

并列运行的系统或电厂在失去同步时会产生振荡,此时要求继电保护装置不能误动,而在振荡过程中发生故障时要求保护可靠动作。随着电力网络的复杂化,振荡发生的可能性大大增加。如何仿真出符合实际情况的系统振荡,进而对振荡情况下继电保护的动作为进行分析成为必须解决的问题<sup>[1]</sup>。

通常有 2 种振荡建模方案。一种是建立一个复杂的环网,通过模拟系统运行条件的变化来仿真振荡。但是,引起电力系统振荡的原因很多,运行条件差别也较大,这种建模方式不仅随机性大,而且振荡的各类参数,如首次摆开 180 的时间、最小振荡周期、频率变化规律等,都是不可控的。显然,这种建模方式不适合继电保护的研究。另一种方案是建立一个典型的双端系统模型,通过改变两侧系统电动势的频率来实现振荡。这种方法可以较好地仿真出电力系统在振荡时的各种变化,振荡参数的设置也较为容易,可以满足继电保护研究的需要。这种方案的难点在于频率变化方式的拟合,既要满足电力系统的约束条件,又要具备较好的参数可控性。目前,国内外仅有文献[2-4]进行了有益的探索。文献[2]根据实际的录波波形,建立了一种基于 EMTP 的系统振荡模型,该模型分为起振和振荡加速 2 个阶段。文献[3]在此基础上提出了振荡模型的机电约束条件,并建立了全过程的系统振荡模型,可以仿真出系统从起振、振荡加速、振荡衰减,再到振荡平息的全过程。文献[4]则在频率拟合方法上进行

了改进。

在对振荡的仿真中发现,现有的建模方法在具体实现上,改变的都是“0-t 时间段的平均频率”,该频率不能完全真实地反映系统的实际运行情况,因此,在频率拟合时,不能直接用其分析电力系统的约束条件。文献[3]考虑到这点,提出了双频的思想,并成功地仿真出全过程振荡。但是,2 个频率的存在势必增加频率拟合时约束条件的数量,其中有些条件是基于“理论频率”(0-t 时间段平均频率)的建模方法所造成,大量仿真表明,这些条件可以被忽略。

通过对频率概念的分析,本文提出了基于瞬时频率的建模方法,并对其实现进行了研究。基于瞬时频率建立的系统模型,将从根本上摆脱“0-t 时间段平均频率”的束缚,仅需对瞬时频率的变化进行拟合就能仿真出整个振荡过程。瞬时频率能够反映系统的实际运行情况,因此拟合过程更为合理,参数设置也更加灵活。在此基础上,本文建立了一种全过程振荡模型,并通过 MATLAB 的电力系统仿真软件包 PSB,对其振荡以及振荡中发生故障的情况进行了仿真。

### 1 0-t 时间段平均(角)频率和瞬时频率分析

#### 1.1 0-t 时间段的平均(角)频率

如图 1 所示,正常情况下,两侧系统频率均为 50 Hz,发生振荡时,两侧频率偏离原来的数值,两侧电动势的相角差在 0°~360°之间变化。

文献[2-3]均假设两端电动势为:

$$\begin{cases} e_{MA} = E_M \sin 2 f_M t \\ e_{MB} = E_M \sin(2 f_M t - 120^\circ) \\ e_{MC} = E_M \sin(2 f_M t + 120^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2008-07-31; 修回日期: 2008-10-13。

国家自然科学基金资助项目(50777040)。

$$\begin{cases} e_{NA} = E_N \sin 2 f_N t \\ e_{NB} = E_N \sin(2 f_N t - 120^\circ) \\ e_{NC} = E_N \sin(2 f_N t + 120^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

其中,一端频率升高,另一端频率下降,即

$$\begin{cases} f_M = 50 + a(t) \\ f_N = 50 - a(t) \end{cases} \quad (3)$$

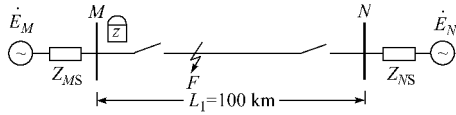


图1 双电源振荡仿真模型

Fig. 1 Oscillation model based on two supply system

显然,通过改变两侧电动势的频率可以实现振荡,但是,所改变频率的实际含义究竟是什么,至今鲜有文献进行研究。

众所周知,正弦信号的一般表达式为:

$$i(t) = I(t) \sin(\omega(t)t) = I(t) \sin(\omega(t)t + \theta_0) = I(t) \sin(2 f(t)t + \theta_0) \quad (4)$$

式中:幅值  $I(t)$ 、角频率  $\omega(t)$ 、初相角  $\theta_0$  称为正弦量的三要素。

下面简要分析  $\omega(t)$  的含义。

在 0 时刻,正弦量相角为  $\theta_0$ ,  $t$  时刻变为  $\omega(t)t + \theta_0$ ,角频率为  $\omega(t)$ ,由式(4)可知:

$$\omega(t) = \frac{d}{dt}(\omega(t)t + \theta_0) \quad (5)$$

可见,  $\omega(t)$  实际上代表的是“0-t 时间段的平均角频率”,其对应的频率  $f(t) = \omega(t) / (2\pi)$ ,也就是“0-t 时间段的平均频率”。显然,这 2 个参数并无实际意义,不能直接用其分析电力系统的约束条件。

### 1.2 瞬时(角)频率

反映电力系统实际运行情况的角频率表示为:

$$\omega_{in}(t) = \frac{d}{dt}(\omega(t)t + \theta_0) \quad (6)$$

相应的频率为:

$$f_{in}(t) = \frac{\omega_{in}(t)}{2\pi} \quad (7)$$

该频率仅与时刻  $t$  有关,可以称其为  $t$  时刻的瞬时频率,它代表了电力系统在该时刻的实际运行状态,是进行仿真和分析的基础。

对式(6)积分可以得到相角的表达式为:

$$\omega(t) = \int_0^t \omega_{in}(t) dt + \theta_0 \quad (8)$$

继而推得基于瞬时频率的正弦量为:

$$i(t) = I(t) \sin(\omega(t)) = I(t) \sin\left(\int_0^t \omega_{in}(t) dt + \theta_0\right) = I(t) \sin\left(\int_0^t 2\pi f_{in}(t) dt + \theta_0\right) \quad (9)$$

因此,基于瞬时频率的两侧电源电动势为:

$$\begin{cases} e_{MA} = E_M \sin\left(\int_0^t 2\pi f_{inM}(t) dt + \theta_0\right) \\ e_{MB} = E_M \sin\left(\int_0^t 2\pi f_{inM}(t) dt + \theta_0 - 120^\circ\right) \\ e_{MC} = E_M \sin\left(\int_0^t 2\pi f_{inM}(t) dt + \theta_0 + 120^\circ\right) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} e_{NA} = E_N \sin\left(\int_0^t 2\pi f_{inN}(t) dt + \theta_0\right) \\ e_{NB} = E_N \sin\left(\int_0^t 2\pi f_{inN}(t) dt + \theta_0 - 120^\circ\right) \\ e_{NC} = E_N \sin\left(\int_0^t 2\pi f_{inN}(t) dt + \theta_0 + 120^\circ\right) \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\theta_0$  为正常运行时 M 侧电动势超前于 N 侧的角度,以此仿真出负荷电流。

### 1.3 2 种频率在仿真实现上的差异

现有振荡模型都是通过改变两侧电动势“0-t 时间段的平均频率”来实现振荡,如式(1)、式(2)所示,其电源电动势的实现方法如图 2 所示。

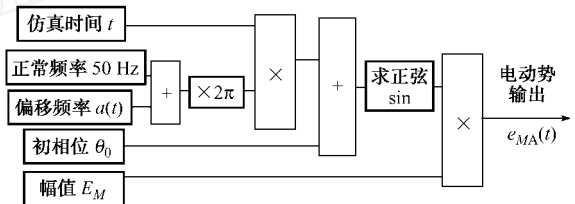


图2 基于 0-t 时间段平均频率的振荡实现

Fig. 2 Realization of oscillation based on “average frequency of 0-t interval”

以 M 侧 A 相系统电动势为例,考虑初相位  $\theta_0$  (仿真负荷电流的需要) 即有:

$$e_{MA}(t) = E_M \sin(2\pi f_M t + \theta_0) \quad (12)$$

式中:  $f_M = 50 + a(t)$ 。

图 3 是基于瞬时频率的实现方法。

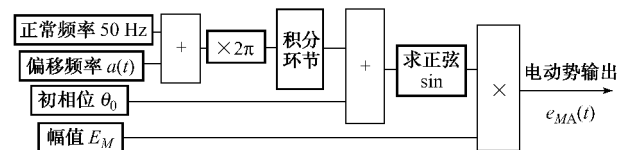


图3 基于瞬时频率的振荡实现

Fig. 3 Realization of oscillation based on instantaneous frequency

仍以 M 侧 A 相的系统电动势为例,即

$$e_{MA}(t) = E_M \sin\left(\int_0^t 2\pi f_{inM}(t) dt + \theta_0\right) \quad (13)$$

式中:  $f_{inM} = 50 + a(t)$ 。

基于瞬时频率建立系统模型,将从根本上摆脱“0-t 时间段平均频率”的束缚,仅需对瞬时频率的变化进行拟合就能仿真出整个振荡过程。

## 2 电力系统振荡建模的机电约束条件

明确了频率概念后,就需对瞬时频率的变化进

行拟合,以仿真出系统在振荡时的运行状态。

瞬时频率首先要满足机电约束条件。同步电动机的运动方程如下:

$$T_J \frac{d\omega_{in}(t)}{dt} = 2 T_J \frac{df_{in}(t)}{dt} = T_m(t) - T_e(t) \quad (14)$$

式中:  $T_J$  为发电机组的惯性常数;  $T_m(t)$  和  $T_e(t)$  分别为原动机的机械转矩和发电机的电磁转矩;  $\omega_{in}(t)$  和  $f_{in}(t)$  分别为系统在  $t$  时刻的瞬时角频率和瞬时频率。

根据牛顿第二定律,原动机的机械转矩和发电机的电磁转矩都不应发生突变,因此对瞬时频率进行拟合时,应保证频率在整个时间轴上的连续性和可导性。这可称为振荡仿真的机电约束条件<sup>[3-5]</sup>。

### 3 基于瞬时频率的全过程系统振荡模型

在满足机电约束条件下,可以把整个振荡过程分为3个阶段:开始振荡至两侧摆角达到  $180^\circ$ ,振荡加速至最大瞬时频率差  $f_{max}$ ,振荡减速至振荡结束。

采用基于瞬时频率的电源模型(式(10)、式(11))和单端频率变化的方式,即

$$\begin{cases} f_{inM} = 50 + a(t) \\ f_{inN} = 50 \end{cases} \quad (15)$$

两侧瞬时频率之差为  $f_{in}(t) = a(t)$ 。

下面是一种利用多项式拟合出的瞬时频率变化模型,其中可供输入的参数如图4所示,共7个。

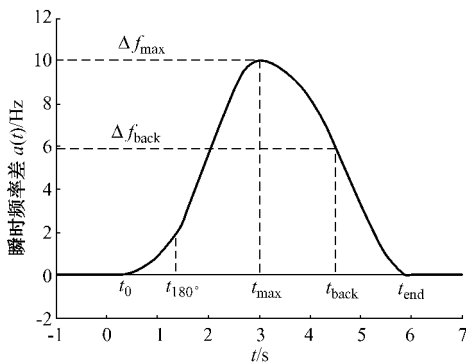


图4 拟合的瞬时频率差变化曲线

Fig. 4 Fitted curve of instantaneous frequency difference

拟合方程为:

$$\begin{cases} f_1(t) = a_2 t^2 + a_1 t + a_0 & t_0 < t < t_{180^\circ} \\ f_2(t) = b_3 t^3 + b_2 t^2 + b_1 t + b_0 & t_{180^\circ} < t < t_{max} \\ f_3(t) = c_2 t^2 + c_1 t + c_0 & t_{max} < t < t_{back} \\ f_4(t) = d_3 t^3 + d_2 t^2 + d_1 t + d_0 & t_{back} < t < t_{end} \end{cases} \quad (16)$$

下面简要介绍各参数的求解过程:

1)  $t = t_0$  时刻,振荡开始,两侧电源摆角由正常运行时的  $\theta_0$  单调增加,并在  $t = t_{180^\circ}$  时达到  $180^\circ$ ,即

$$\int_{t_0}^{t_{180^\circ}} \omega_{in}(t) dt + \theta_0 = \int_{t_0}^{t_{180^\circ}} 2 f_{in}(t) dt + \theta_0 = \pi \quad (17)$$

由  $f_{in}(t) = a(t)$  得:

$$\int_{t_0}^{t_{180^\circ}} 2 a(t) dt + \theta_0 = \int_{t_0}^{t_{180^\circ}} 2 f_1(t) dt + \theta_0 = \pi \quad (18)$$

另外,为了保证瞬时频率在  $t = t_0$  时刻的连续性和可导性,  $f_1(t)$  还需满足:  $f_1(t_0) = 0, f_1'(t_0) = 0$ , 结合式(18),可解得参数  $a_2, a_1, a_0$ 。

2)  $t = t_{max}$  时刻,达到最大瞬时频率差  $f_{max}$ ,即  $f_2(t_{max}) = f_{max}$ 。另外,为了保证瞬时频率在  $t = t_{180^\circ}$  时刻的连续性、可导性以及及在  $t = t_{max}$  时达到极点,  $f_2(t)$  还需满足:  $f_2(t_{180^\circ}) = f_1(t_{180^\circ}), f_2'(t_{180^\circ}) = f_1'(t_{180^\circ})$  以及  $f_2(t_{max}) = 0$ , 联立  $f_2(t_{max}) = f_{max}$  解得参数  $b_3, b_2, b_1, b_0$ 。

3)  $t = t_{back}$  时刻,瞬时频率差降为  $f_{back}$ ,即  $f_3(t_{back}) = f_{back}$ 。为了保证瞬时频率在  $t = t_{max}$  时刻的连续性、可导性,  $f_3(t)$  还需满足:  $f_3(t_{max}) = f_2(t_{max}), f_3'(t_{max}) = f_2'(t_{max}) = 0$ , 结合公式  $f_3(t_{back}) = f_{back}$ , 解得参数  $c_2, c_1, c_0$ 。

4)  $t = t_{end}$  时刻,瞬时频率差降为 0,即  $f_4(t_{end}) = 0$ 。另外,为保证瞬时频率在  $t = t_{back}$  和  $t = t_{end}$  时刻的连续性、可导性,  $f_4(t)$  还需满足:  $f_4(t_{back}) = f_3(t_{back}), f_4'(t_{back}) = f_3'(t_{back})$  以及  $f_4(t_{end}) = 0$ , 解得参数  $d_3, d_2, d_1, d_0$ 。

设置正常运行时,  $M$  侧电源电动势超前  $N$  侧  $20^\circ$ ,即  $\theta_0 = 20^\circ$ 。振荡各参数分别设为:  $t_0 = 0.2$  s,  $t_{180^\circ} = 1.2$  s,  $t_{max} = 3$  s,  $t_{back} = 4.5$  s,  $t_{end} = 6$  s,  $f_{max} = 10$  Hz,  $f_{back} = 6$  Hz, 此时,两侧电源瞬时频率差  $a(t)$  的变化曲线如图4所示。

## 4 仿真实验

### 4.1 基于瞬时频率的振荡仿真

利用 MATLAB 的电力系统仿真软件包 PSB 对整个振荡过程进行了仿真,仿真所用系统结构如图1所示。线路部分采用原有的分布参数模型,继电保护部分采用文献[6]设计的成套距离保护模型;电源部分的建模采用本文第1节介绍的基于瞬时频率的实现方法,并通过 MATLAB 提供的开发环境进行编程,设计成新的基于瞬时频率的电源模型;  $M$  侧电源的瞬时频率设为  $50 + a(t)$ ,其中  $a(t)$  变化曲线如图4所示,  $N$  侧电源的瞬时频率设定为 50 Hz;

仿真时间为 7 s,采样间隔为 1 ms。在 M 侧测得的电压、电流以及零序电流波形如图 5 所示。

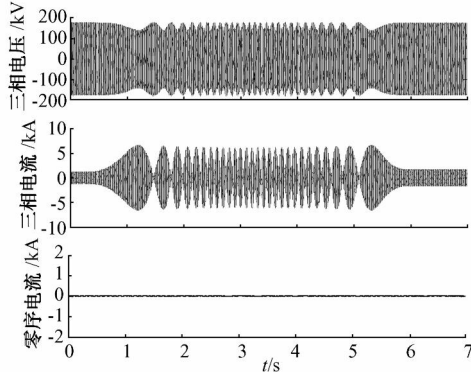


图 5 振荡情况下的电流及电压波形  
Fig. 5 Voltage and current waveforms during oscillation

可以通过测量阻抗轨迹的变化来验证仿真的准确性。设置系统振荡至  $t=3\text{ s}$  时,两侧电动势达到最大频率差 10 Hz,其对应最小振荡周期为 100 ms。因此,可以从阻抗轨迹中截取  $t$  为 2.950 s~3.050 s 的部分进行验证。

图 6 为 M 侧距离保护<sup>[6]</sup>在  $t$  为 2.950 s~3.050 s 时间范围内的测量阻抗轨迹。从局部放大大部分可以清楚地看出,100 ms 内的阻抗轨迹刚好接近于闭合, $t=2.950\text{ s}$  对应的起点和  $t=3.050\text{ s}$  对应的终点也接近于重合。这说明,在  $t=3\text{ s}$  附近,系统的振荡周期接近于 100 ms,从而验证了模型的准确性。

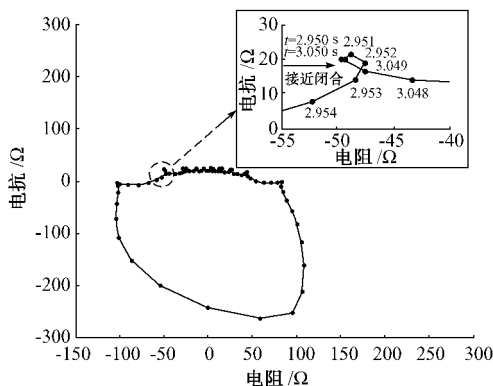


图 6 振荡情况下的测量阻抗轨迹  
Fig. 6 Measured impedance trace during oscillation

#### 4.2 基于瞬时频率的振荡中故障仿真

振荡中发生故障时,各种保护装置的动作行为是需要重点考察的内容。因此,本文对振荡中发生故障的情况也进行了仿真。

沿用本文 4.1 节采用的系统模型和参数,振荡开始时刻为  $t=0.2\text{ s}$ ,设定  $t=1.3\text{ s}$  时距离 M 侧母线 40 km 处发生 A 相接地故障,仿真时间为 2 s。

此时,在 M 侧测得的电压、电流以及零序电流波形如图 7 所示。

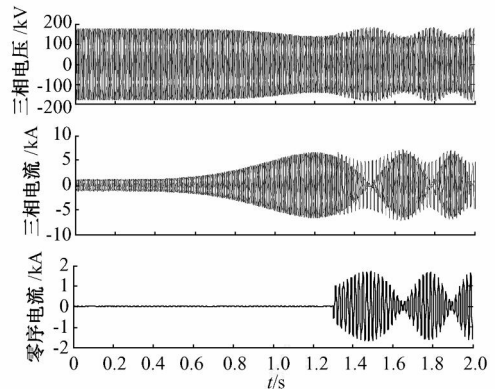


图 7 振荡中发生故障时的电流及电压波形  
Fig. 7 Voltage and current waveforms during oscillation with fault

### 5 结语

现有的振荡模型都是通过改变“0-t 时间段的平均频率”来实现,而该频率不能准确地反映系统的实际运行状态,因此,在对频率变化进行拟合时,就带来了诸多困难。本文通过对频率概念的分析,提出了基于瞬时频率的振荡建模新方法。运用该方法,只需对瞬时频率的变化进行拟合就能仿真出整个振荡过程。瞬时频率本质上就是系统的实际运行频率,因此,拟合过程更为合理,参数设置也更加灵活。在此基础上,本文建立了一种符合机电约束条件的全过程振荡模型,并利用 MATLAB 的电力仿真软件包 PSB 对其在振荡以及振荡中发生故障的情况进行了仿真。仿真结果表明,该模型可以准确地反映预先设置的频率变化规律,符合继电保护研究的要求。特别地,基于瞬时频率的建模方法完全可用于建立更为复杂的频率变化模型,因此有着广阔的应用前景。

### 参考文献

- [1] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 孔繁鹏,葛耀中. 一种用于测试保护的系统振荡模型. 电力系统自动化,1995,19(8):38-42.  
KONG Fanpeng, GE Yaozhong. A power swing digital simulation model for testing relay's protective property. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(8): 38-42.
- [3] 林湘宁,刘沛,胡帆. 面向继电保护的全过程系统振荡仿真. 电力系统自动化,2003,27(22):56-59.  
LIN Xiangning, LIU Pei, HU Fan. Complete power system oscillation simulation for relay protective research. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 56-59.

(下转第 66 页 continued on page 66)

- System Technology, 2004, 28(5): 22-24, 34.
- [10] 汤奕,于继来,周苏荃. 电力网络源流路径电气剖分算法. 电力系统自动化, 2006, 30(22): 28-33.
- TANG Yi, YU Jilai, ZHOU Suquan. Electrical dissection algorithm of electric power network. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 28-33.

研究方向: 电力系统自动化、牵引供电系统理论与技术。  
E-mail: 08117324@bjtu.edu.cn

刘明光(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统自动化、高压绝缘在线监测与故障诊断。

陈秋琳(1980—), 女, 硕士, 主要研究方向: 电力调度自动化。

屈志坚(1978—), 男, 通信作者, 博士研究生, 讲师, 主要

### Source-flow Chain Based New Topology Algorithm for Multi-source Distribution Network

QU Zhijian<sup>1,2</sup>, LIU Mingguang<sup>1</sup>, CHEN Qiulin<sup>3</sup>, YANG Gang<sup>1</sup>, ZHANG Jiwei<sup>1</sup>, LIU Tie<sup>1</sup>

- (1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;  
3. Beijing Tigest Time Automation System Equipment Co. Ltd., Beijing 100054, China)

**Abstract:** A new topology algorithm is proposed for remote real-time monitoring of the distribution network main wiring diagram. The source-flow line of multi-source distribution network is described, and the source-flow chain and its properties are defined. The source-flow chains are classified into unidirectional, bidirectional and multidirectional source-flow chains according to the distribution network topology graph. Accordingly, a gradual deepening strategy for source-flow chain tracking is adopted following the unidirectional, bidirectional and multidirectional simultaneous tracking. Chain data and the attribute domain model are developed based on directivity and motility of the source-flow chain. Comprehensive skills including sub-section tracking and checkpoints setting are used in the new method to improve the tracking efficiency. The new method has been used in topology analysis of the tele-control of a railway power system.

This work is supported by 2009 Science and Technology Project of Jiangxi Province Educational Department (No. GJ09223).

**Key words:** network topology analysis; source-flow chain; synchronous tracking; checkpoint

(上接第 40 页 continued from page 40)

- [4] 章启明, 乐全明, 费铭薇, 等. 超高压电网全过程振荡仿真新模型研究. 继电器, 2006, 34(9): 13-15.
- ZHANG Qiming, YUE Quanming, FEI Mingwei, et al. Research of complete power network oscillation simulation model. Relay, 2006, 34(9): 13-15.
- [5] 夏道止. 电力系统分析. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [6] XU Ming, GAO Houlei, YAN Chao. Matlab/simulink based dynamic simulation system for distance protection. Transactions of Tianjin University, 2008, 14(2): 112-117.

许明(1980—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向: 继电保护动态仿真. E-mail: xuming@mail.sdu.edu.cn

高厚磊(1963—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 继电保护和广域同步测量. E-mail: houleig@sdu.edu.cn

邹贵彬(1971—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向: 继电保护。

### Instantaneous Frequency Based Power System Oscillation Modeling Method for Relay Protection

XU Ming, GAO Houlei, ZOU Guibin, HOU Meiyi (Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Currently available oscillation modeling methods are all based on changing the "average frequency of 0-t interval", which cannot directly reflect the actual state of a power system. To solve the problem, this paper proposes a new modeling method based on instantaneous frequency. By fitting the changes of instantaneous frequency under constraint conditions, the method can accurately simulate the oscillation process of a real system without introducing the "average frequency of 0-t interval". With this method, an oscillation model reflecting the whole process is developed, with two typical cases of oscillation (without/with fault) simulated using the power system block (PSB) in MATLAB software. The simulation results show that this model can satisfactorily match the preset curve of frequency during oscillation, and is ideally suitable for research on the performance evaluation of relay protection.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50777040).

**Key words:** power system oscillation model; instantaneous frequency; relay protection