

## 一种综合判别电力系统失步的新方法

张洪喜, 沈 军, 赵青春, 朱晓彤

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 本文通过对电力系统异步运行状态特征的研究, 提出一种失步保护综合判别新方法。该方法由三部分元件组成, 分别为失步起动诊断元件、失步区域判断元件和失步跳闸时机选择元件。失步起动诊断元件利用系统两侧的功角差和功角滑差判断电力系统是否开始发生失步, 并以正序电压和正序电流作为辅助判断条件以增加可靠性。失步区域判断元件利用区域继电器原理判断失步解列的区域。失步跳闸时机选择元件通过  $U_{\cos}$  原理统计失步次数, 并利用功角差作为辅助判据来选择最佳跳闸时机。当3个元件同时动作时, 失步保护动作将系统解列。该方法准确可靠且不受系统运行方式影响。通过 RTDS 仿真实验, 验证了该方法的可靠性。

**关键词:** 失步保护; 滑差  $d\delta/dt$ ; 区域继电器;  $U_{\cos}$  原理; RTDS 仿真实验

中图分类号: TM77

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)04-0086-05

### 0 引言

失步解列作为保证电力系统安全稳定运行的重要措施, 是保证整个电网不致完全崩溃的最后一道防线<sup>[1,2]</sup>。随着大区电网互联的发展, 电网的结构越来越复杂, 给系统的稳定运行带来严重挑战<sup>[3,4]</sup>。需要研究一种能够准确检测系统失步运行且不受系统运行方式影响的失步保护方法<sup>[5,6]</sup>。

利用电流幅值包络线周期性变化检测异步状态的解列装置, 结构简单, 易于实现, 但其随运行方式的变化需要改变定值<sup>[7]</sup>; 利用失步断面两侧电势相量的相角差检测失步的解列装置, 可实现失步的预测功能, 但在短路时电压阻抗角也可能发生急剧变化, 需采取措施避免误判<sup>[7]</sup>; 利用相位角原理<sup>[8]</sup>的失步保护方法在发生复杂转换性故障时存在误判风险。

本文提出一种失步保护综合判别新方法。该方法由失步起动诊断元件、失步区域判断元件和失步跳闸时机选择元件三部分组成。失步起动诊断元件判断电力系统是否开始发生失步。失步区域判断元件判断失步解列的区域。失步跳闸时机选择元件选择最佳跳闸时机。当上述3个元件同时动作时, 失步保护动作将系统解列。该方法综合考虑了系统失步时的变化规律和特征, 有效提高了失步保护判别的准确性和可靠性。

### 1 失步起动诊断元件

#### 1.1 滑差计算方法

电力系统失步时, 可将所有机组分为两个机

群, 用两机等值系统进行分析<sup>[9]</sup>。简单两机等值系统接线如图1所示。用简单电动势来表示等值发电机, 两侧的系统阻抗分别为  $Z_M$  和  $Z_N$ , 线路阻抗为  $Z_{Line}$ 。

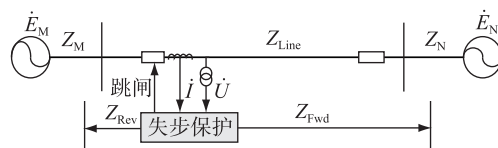


图1 简单两机等值系统

Fig.1 Equivalent two-machine power system

图1所示的等值双机系统模型, 在分析时采用下列假设条件:

- (1) 两等值机电势分别为  $\dot{E}_M$  和  $\dot{E}_N$ , 且电势幅值相等。
- (2) 系统与线路的阻抗角相等且固定不变, 阻抗角为  $90^\circ$ 。

图1中,  $\dot{U}$ ,  $\dot{I}$  分别为本地测量电压和测量电流;  $Z_{Fwd}$  为保护安装处往线路方向的正向阻抗定值;  $Z_{Rev}$  为保护安装处往系统方向的反向阻抗定值。利用测量电压、测量电流以及正、反方向阻抗定值计算出正、反方向阻抗所指末端的电压  $\dot{U}_{Fwd}$  和  $\dot{U}_{Rev}$ , 计算公式如下:

$$\begin{cases} \dot{U}_{Fwd} = \dot{U} - \dot{I}Z_{Fwd} \\ \dot{U}_{Rev} = \dot{U} + \dot{I}Z_{Rev} \end{cases} \quad (1)$$

令:

$$\begin{cases} \dot{U}_{Fwd} = U_{Fwd} \angle \delta_{Fwd} \\ \dot{U}_{Rev} = U_{Rev} \angle \delta_{Rev} \end{cases} \quad (2)$$

根据正、反方向阻抗末端电压计算两侧的电压

相角差,如式(3)所示:

$$\Delta\delta = \delta_{\text{Fed}} - \delta_{\text{Rev}} \quad (3)$$

再利用电压相角差随时间的变化率计算出电压两端的滑差  $d\delta/dt$ 。

## 1.2 失步起动诊断元件逻辑

当系统开始发生失步时,系统两侧的相角被逐渐拉开,滑差也逐渐增大。经过一定时间后,相角差  $\Delta\delta$  将大于设定的阈值  $\delta_{\text{default}}$ 。滑差  $d\delta/dt$  也将大于设定的阈值  $K_{\text{default}}$ 。利用这些特征进行失步起动的判别。同时,当系统发生失步时,正序电压和电流的幅值也会发生周期性的变化。为了增加失步起动诊断元件的可靠性,特增加正序电压和电流作为辅助判别条件。动作逻辑如图2所示,其中:  $U_{\text{default}}$ ,  $I_{\text{default}}$ ,  $\delta_{\text{default}}$  和  $K_{\text{default}}$  分别为电压、电流、相角差和滑差的阈值。

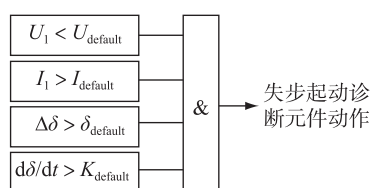


图2 失步起动诊断元件逻辑

Fig.2 Start logic of detection of OOS

当系统失步时,失步的周期有长有短。为了提高失步诊断元件的灵敏度,滑差的阈值以长周期(经验值为3s)为标准并保留一定裕度。在程序实施时,这些阈值均在程序内部固定,无需用户整定,以便减轻运行人员的定值整定负担。

## 2 失步区域判断元件

运行中的系统必需在适当的位置设置解列点。当系统发生失步时,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2个或几个部分,防止系统长时间不能拉入同步而造成系统频率和电压崩溃,导致事故扩大<sup>[9]</sup>。

本文采用区域阻抗继电器原理来判断失步发生的区域。由正、反方向阻抗定值  $Z_{\text{Fwd}}$  和  $Z_{\text{Rev}}$  以及线路正序灵敏角  $\theta$  为直径的区域阻抗继电器在阻抗平面动作特性如图3所示。由区域阻抗继电器确定的阻抗圆内部是动作区,当测量阻抗  $Z_m$  穿过阻抗圆时,失步区域判断元件动作。

## 3 失步跳闸时机选择元件

### 3.1 基于 $U_{\text{cos}}$ 失步次数统计原理

系统在失步状态下,电压最低点称为失步中心<sup>[10-12]</sup>。在一次失步周期中,对于等值两机系统,

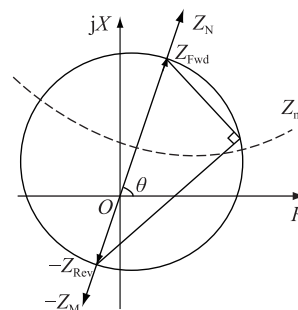


图3 区域继电器动作特性

Fig.3 Characteristics of regional distance relay  
在某一时刻,失步中心电压过零点<sup>[13,14]</sup>。

当系统失步时,取  $N$  侧等值电势  $\dot{E}_N$  为参考基准量,令其相位角为  $0^\circ$ ;取  $M$  侧等值电势  $\dot{E}_M$  的初始相角为  $\alpha$ 。从而可得系统两侧电势如式(4)和(5)所示:

$$\dot{E}_N = \cos(\omega t) \quad (4)$$

$$\dot{E}_M = \cos[(\omega + \Delta\omega)t + \alpha] \quad (5)$$

两机等值系统的相量如图4所示,其功角为:  $\delta = \Delta\omega t + \alpha$ 。

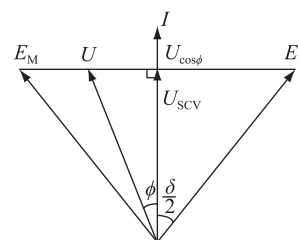


图4 两机等值系统向量

Fig.4 Vector diagram of equivalent system

由图4可知,失步中心的电压  $U_{\text{scv}}$  为  $U_{\text{cos}\phi}$ 。由于测量电压  $U_{\text{cos}\phi}$  是取  $\dot{U}$  在  $\dot{I}$  上的投影,故  $U_{\text{cos}\phi}$  是反映失步中心电压  $U_{\text{scv}}$  的标量,即:

$$U_{\text{scv}} = U_{\text{cos}\phi} = \cos\delta/2 = \cos(\Delta\omega t + \alpha)/2 \quad (6)$$

当系统失步运行时,  $\Delta\omega \neq 0$ ,失步中心电压呈周期性变化,失步周期为  $360^\circ$ 。即:

$$U_{\text{scv}} = \cos(\Delta\omega t + \alpha)/2 \quad (7)$$

(1) 若  $\Delta\omega > 0$ ,即加速失步, $\delta$ 的变化趋势为  $0^\circ \rightarrow 360^\circ (0^\circ) \rightarrow 360^\circ$ ,失步中心电压  $U_{\text{scv}}$  的变化曲线如图5(a)所示;

(2) 若  $\Delta\omega < 0$ ,即减速失步, $\delta$ 的变化趋势为  $360^\circ \rightarrow 0^\circ (360^\circ) \rightarrow 0^\circ$ ,振荡中心电压  $U_{\text{scv}}$  的变化曲线如图5(b)所示。

根据图5中失步中心电压的变化研究适用于失步次数统计的方法。

### 3.2 失步跳闸时机选择逻辑

由式(6)可知,失步中心电压与功角  $\delta$  之间存

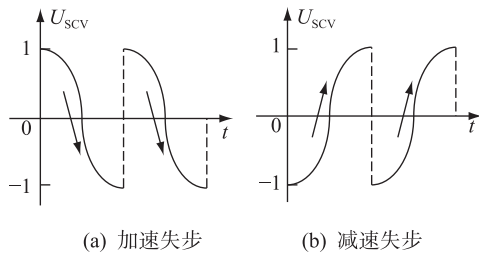


图5 失步中心电压变化曲线

Fig.5 Curve of oscillating center voltage

在确定的函数,因此可以利用失步中心电压的变化反映功角的变化。如图5所示,作为状态量的功角是连续变化的,因此在失步时失步中心电压也是连续变化的,且过零点。当系统失步时,利用这一特征统计失步发生的次数:

(1) 当失步中心电压从正值过零点变为负值时记为一次加速失步;

(2) 当失步中心电压从负值经过零点变为正值时记为一次减速失步。

失步起动诊断元件动作后,开始分别统计加速失步和减速失步次数。

如果失步保护在系统两侧功角较大时跳闸解列,对开关的拉弧能力冲击较大。为了避免这种情况的发生,特增加系统两侧功角差小于整定值作为辅助判断条件。即当失步次数大于整定值  $N_{set}$  且系统两侧功角差小于整定值  $\delta_{set}$  时,失步跳闸时机选择元件动作。其逻辑如图6所示。

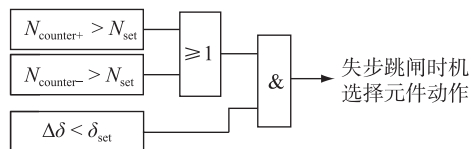


图6 跳闸时机选择元件逻辑

Fig.6 Logic of selection of OOS

综上,当失步起动诊断元件、失步区域判断元件和失步跳闸时机选择元件同时动作时,失步保护动作将系统解列。失步保护动作逻辑如图7所示。



图7 失步保护动作逻辑

Fig.7 Trip logic of out-of-step

## 4 RTDS 仿真分析

### 4.1 仿真系统介绍

为了考核本文提出的失步保护方法在系统失

步时的动作行为,搭建如图8所示的RTDS实验仿真系统<sup>[15-17]</sup>。

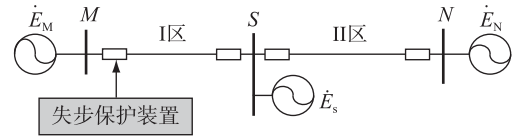


图8 三机两区域系统

Fig.8 Three-terminal equivalent system

该系统为简单三机两区系统。系统电压为275 kV,工作频率为50 Hz。线路MS与SN的参数相同且长度均为50 km,其参数如表1所示。

表1 仿真模型线路参数

Table 1 Line parameter of simulation module

参数名称	$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$	
	线路MS	线路SN
正序电阻	0.038 44	0.038 44
正序电抗	0.286 03	0.286 03
零序电阻	0.275 879	0.275 879
零序电抗	0.884 332	0.884 332

失步保护装置安装在M侧。实验时,将M侧发电机机端电压控制在50 Hz,通过改变S侧、N侧发电机机端电压的输出频率,模拟失步发生在I区或II区。

重点考察本失步保护的失步起动诊断功能、失步保护区域判断功能和失步跳闸时机选择功能。失步保护装置中正、反方向阻抗定值按照被保护线路的全长整定,并留一定裕度;失步次数  $N_{set}$  整定为2;系统两侧功角差定值  $\delta_{set}$  整定为  $60^\circ$ 。

### 4.2 仿真结果分析

仿真结果如图9—11所示,图中GA1VA—GA1VC表示三相电压;GA1IA—GA1IC表示三相电流;78.OOS\_St表示失步保护起动信号;78.OOS\_Op表示失步保护动作信号。图9—10表明,当失步中心位于被保护线路时,无论是加速失步还是减速失步,无论失步周期的长短,失步保护装置均能正确诊断出系统发生了失步,且在设定的跳闸时间条件下 ( $N_{set}=2, \delta_{set}<60^\circ$ ) 动作跳闸,将系统解列。

图11表明,当失步中心不在区域距离继电器范围内时,失步保护可靠不动作,保证下级线路的失步保护优先动作。

通过上述仿真分析,证明本文提出的失步保护方法能正确判断系统是否发生失步,准确判断失步发生的区域,并能够在最佳时间跳闸将系统解列,以保证系统安全稳定运行<sup>[17,18]</sup>。

该方法已经在海外版失步保护装置中得到实

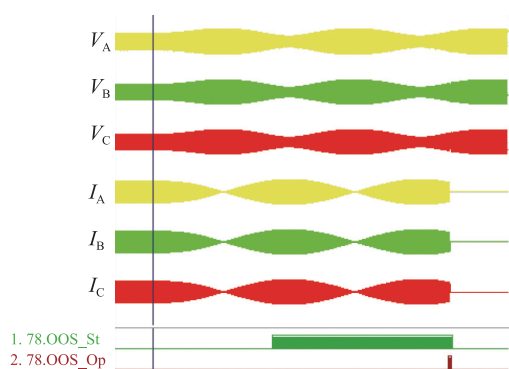


图9 失步保护动作波形

( I 区失步、加速失步、周期 1.5 s)

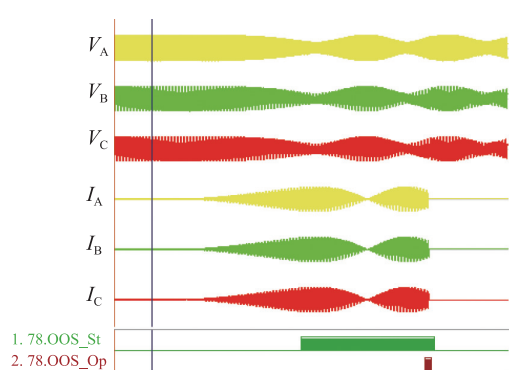
Fig.9 Operation wave of OOS  
( Area I, Acceleration OOS, 1.5 Seconds)

图10 失步保护动作波形

( I 区失步、减速失步、周期 0.5 s)

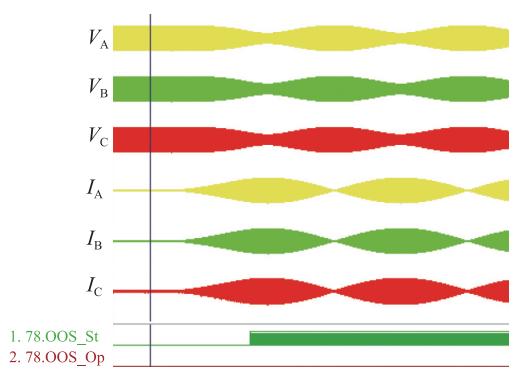
Fig.10 Operation wave of OOS  
( Area I, Deceleration OOS, 0.5 Seconds)

图11 失步保护不动作波形

( II 区失步,区域继电器范围之外)

Fig.11 No operation wave of OOS  
( Area II, Out of Regional Distance Relay)

施。并在韩国、巴西等多个国家和地区得到应用,目前运行情况良好。

## 5 结语

本文提出了一种综合判断电力系统失步的方法。该方法统筹考虑了系统发生失步时的有效特征,提高了基于单侧量判断系统失步的可靠性。同

时该方法不受系统运行方式影响,定值整定简单,有效降低运维人员的工作量。最后通过 RTDS 仿真实验,验证了该方法的正确性。该方法已经在海外多个国家和地区得到工程应用,效果良好。

## 参考文献:

- [1] 袁季修. 电力系统安全稳定控制[M]. 北京:中国电力出版社,1996: 123-127.  
YUAN Jixiu. Power system security stability control[M]. Beijing: China Electric Power Press,1996: 123-127.
- [2] 甘德强,胡江溢,韩祯祥. 2003 年国际若干停电事故思考[J]. 电力系统自动化,2004,28(3): 1-4,9.  
GAN Deqiang, HU Jiangyi, HAN Zhenxiang. After the 2003 blackouts across several continents[J]. Automation of Electric Power System, 2004, 28(3): 1-4,9
- [3] 韩祯祥,曹一家. 电力系统的安全性及防御措施[J]. 电网技术,2004,28(9): 1-6.  
HAN Zhenxiang, CAO Yijia. Power system security and its prevention[J]. Power System Technology, 2004,28(9): 1-6.
- [4] 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: 220-228.  
ZHU Shengshi. Principles and techniques of protective relaying for HV grid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 220-228.
- [5] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京:中国电力出版社,1999: 110.  
WANG Meiyi. Application of relay in power systems[M]. Beijing: China Electric Power System Press,1999: 110.
- [6] 高鹏,王建全,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 System, 2005, 29(19): 90-96.
- [7] 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.
- [8] 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 mechanism based on principle of phase angle[J]. Power System Protection and Control, 2010,38(7): 1-6.
- [9] 高鹏. 一种新型电力系统失步解列原理[D]. 杭州:浙江大学,2005.  
GAO Peng. A new principle of out-of-step separation based on power system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [10] 邓华,高鹏,王建全. 关于振荡角的振荡中心电压和



- ucos 的变化特征[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(1): 68-73.
- DENG Hua, GAO Peng WANG Jianquan. Oscillation center voltage of oscillation-angle and the characteristics of ucos[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(1): 68-73.
- [11] 宗洪良, 任祖怡, 郑玉平, 等. 基于 ucos 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 System, 2003, 27(19): 83-85.
- [12] 李 莉, 刘玉田. 一种系统断面自适应复合解列判据[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 40-43.
- LI Li, LIU Yutian. Adaptive out-of-step detecting composite criterion for splitting surface[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 40-43.
- [13] 陈恩泽, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于支路两端母线频差的失步解列判据研究[J]. 电力系统自动化设备, 2014, 34(3): 71-77.
- CHEN Enze, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Out-of-step splitting criterion based on bus frequency difference between two terminals [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 71-77.
- [14] 刘福锁, 方勇杰, 李 威, 等. 多频振荡下的失步振荡中心变化规律及其定位[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 68-73.
- LIU Fusuo, FANG Yongjie, LI Wei, et al. Out-of-step oscillation center change rules and its location under multi-frequency oscillation[J]. Automation of Electric Power System, 2014, 38(20): 68-73.
- [15] 李战鹰, 张建设, 黄 河. 南方电网失步解列特性 RTDS 仿真实验研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(1): 31-35.
- LI Zhanying, ZHANG Jianshe, HUANG He. RTDS simulation study on the performance of out-of-step splitting systems in China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2(1): 31-25.
- [16] 刘 凯, 索南加乐. 一种新的高压线路保护振荡闭锁实现方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 7-12.
- LIU Kai, SUONAN Jiale. Swing blocking element of HV line protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 7-12.
- [17] 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): 68-71.
- 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): 68-71.
- [18] 张 华, 林 涛, 陈德树, 等. 微机型发电机失步保护研究[J]. 华中电力, 1999, 12(1): 1-5.
- ZHANG Hua, LIN Tao, CHEN Deshu, et al. Study of computer type out-of-step protection of generators[J]. Central China Electric Power, 1999, 12(1): 1-5.

#### 作者简介:



张洪喜(1983—), 男, 河南鲁山人, 工程师, 从事电力系统继电保护的研究和开发工作 (E-mail: zhanghx@nrec.com);

沈 军(1975—), 男, 江苏南通人, 高级工程师, 从事电力系统继电保护的研究和开发工作;

张洪喜 赵青春(1980—), 男, 湖北武汉人, 高级工程师, 从事电力系统继电保护的研究和管理工作;

朱晓彤(1976—), 男, 江苏常州人, 高级工程师, 从事电力系统继电保护的研究和管理工作。

## A New Method of Synthetic Judging Out-of-step on Power System

ZHANG Hongxi, SHEN Jun, ZHAO Qinchun, ZHU Xiaotong  
(NR Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Based on the study of the characteristics of the asynchronous operating power system, this paper provides a new method of out-of-step protection. This new method consists of three components: out-of-step element diagnostic detection, out-of-step region judgment element and out-of-step trip timing selection element. The first element(out of step diagnostic element) uses differential angle and slip angle between two ends to determine whether power system begins to oscillate. To increase the reliability, the positive sequence voltage and current are used as an auxiliary condition. The second element uses the principle of regional distance relay to judge the oscillation area. The third element uses Ucos principle to count the number of out-of-step, and use differential angle as an auxiliary criterion to select the best opportunity to trip. When these three elements operate at the same time, the out-of-step protection will operate immediately. This new method is accurate and reliable and is not affected by system operation mode, and has been verified on RTDS simulation system.

**Key words:** out-of-step;  $d\delta/dt$ ; regional distance relay; Ucos method; RTDS simulation

(编辑 刘晓燕)