

基于PSCAD的大型机组失步保护仿真与整定校验

王玉龙¹,王宝华¹,陆桂华²,杨支吉¹

(1. 南京理工大学自动化学院,江苏南京 210094;2. 江苏省仪征供电公司,江苏仪征 211400)

摘要: 采用由一个透镜型阻抗元件和2个直线阻抗元件构成三元件型失步判据,给出了该判据的动作特性。说明了基于等面积原则的失步预测原理,进行了失步保护整定计算。采用PSCAD软件建立了单机容量为1000 MW的三机无穷大系统的仿真模型、三元件型失步判据仿真模型和等面积预测失步的仿真模型。仿真结果表明,所提失步保护原理正确可靠,而且能精确地预测不稳定振荡并发出失步信号,通过滑极计数切除故障机组,且在稳定振荡时不误动。

关键词: 电力系统保护; 失步振荡; 滑极次数; 等面积原则; 整定; 仿真

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.10.022

0 引言

近年来,电网及机组的容量不断增大,使得失步振荡时振荡中心常落在发变组内,其中振荡电流很大,会引起发电机定子过热过流而损坏发电机。另外失步振荡可能破坏系统的稳定性,波动中的电压、电流会对用户的用电和负荷的供电产生影响,可能会扩大事故范围^[1-3]。同时,规程中规定300 MW及以上发电机组需配置失步保护^[4]。因而,对失步振荡机理深入研究,并分析失步判据来完善大型发电机组失步保护的配置受到越来越多的关注。

电厂在配置和整定发电机的失步保护时,现有的三元件型和双遮挡器判据都可以区分失步振荡中心在发变组内部还是外部,可以整定失步保护跳闸允许电流,整定区内和区外不同的滑极次数,区分失步故障与其他故障^[4-5],但要加强失步预测^[6]。从这个角度讲,将失步预测运用到现有的失步判据中,能更好地配置大型发电机组的失步保护。

本文采用PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件建立了某发电厂的仿真系统模型。根据失步故障特点建立三元件型与基于等面积原则的失步预测相结合的失步保护模型,验证保护在各故障下发信及动作的情况,为具有多台机组的电厂失步保护动作的滑极次数确定及出口动作方式确定提供依据。

1 失步判据原理及整定

1.1 三元件型失步判据^[7-11]

依据失步时的阻抗轨迹变化规律,保护采用由1个透镜型阻抗元件和2个直线阻抗元件构成的三元件型失步判据模型,如图1所示。

根据图1,失步振荡后,若机端测量阻抗轨迹依次穿过OR-IR-IL-OL或OL-IL-IR-OR,且在透镜中满足一定时间,分别判为加速与减速失步。轨迹穿

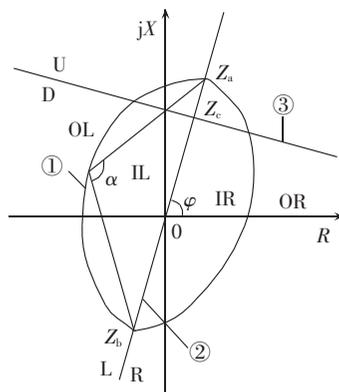


图1 三元件型失步判据动作特性

Fig.1 Operating characteristics of three-component criterion for out-of-step protection

越透镜时在电抗线③下面即经过D区,说明振荡中心位于发变组内部,判断此时失步为区内失步;反之,轨迹穿越透镜时经过U区,说明振荡中心位于发变组以外的系统,判断为区外失步。

1.2 基于等面积原则的失步预测

失步预测模型就是将等面积原则下的 $P_e-\delta$ 曲线转化到 P_e-t 曲线^[12-13],即将图2转化到图3。

图2、3中 δ_0 为故障前功角; δ_c 为故障切除时功角; δ_{max} 为振荡时最大功角; t_0 为故障发生时刻; t_1 为机械输出功率 P_e 超过机械输入功率 P_T 线的时刻; t_{max} 是稳定振荡时 $\delta=\delta_{max}$ 的时刻或不稳定振荡时 $\delta=\pi-\delta_0$ 的时刻。

由加速面积 A_1 和减速面积 A_2 的和来判断,式

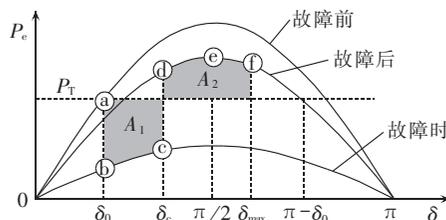


图2 $P_e-\delta$ 曲线

Fig.2 $P_e-\delta$ curve

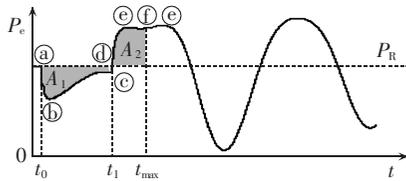


图 3 P_c-t 曲线
Fig.3 P_c-t curve

(1)和(2)的数学积分模型实现等面积原则的失步预测。

稳定振荡:

$$A = A_1 + A_2 = \int_{t_0}^{t_{max}} (P_T^* - P_c^*) dt = 0 \quad (1)$$

失步故障:

$$A = A_1 + A_2 = \int_{t_0}^{t_{max}} (P_T^* - P_c^*) dt > 0 \quad (2)$$

其中, P_T^* 、 P_c^* 分别为机械输入功率标幺值和输出功率标幺值。

根据等面积原则,故障切除后如果系统稳定则找到在振荡的第 1 周期内的最大振荡功角的时刻,从而根据式(1)求出面积和 A ; 如果为不稳定振荡,则直接找到 $\pi - \delta_0$ 的时刻,由式(2)积分后发信号。

1.3 保护整定计算

根据图 1 中的动作特性,遮挡器特性第一象限阻抗为 Z_a 、第三象限阻抗为 Z_b 、阻抗角为 φ 。对图 4 所示系统进行整定计算。

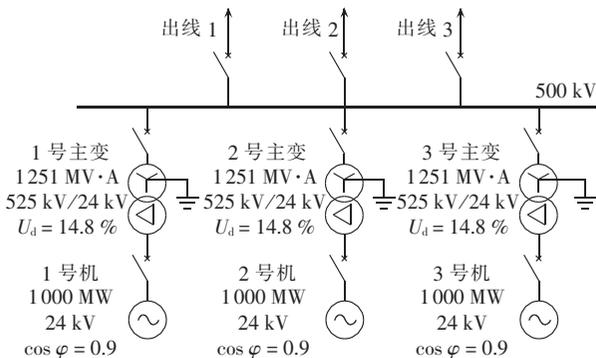


图 4 电厂电气主接线图

Fig.4 Main connection diagram of power plant

3 台机组参数相同,则整定结果(计算和仿真都取一次值,不考虑互感器变比)也相同,发电机额定容量 S_{gn} 为 $1111 \text{ MV}\cdot\text{A}$,额定电压 U_{gn} 为 24 kV ,发电机的暂态电抗 $X'_d=0.382 \text{ p.u.}$,次暂态电抗 $X''_d=0.269 \text{ p.u.}$,变压器的短路阻抗 $X_T=0.1314 \text{ p.u.}$,最大、最小运行方式系统等值阻抗分别为 $X_{s,min}=0.0707 \text{ p.u.}$ 、 $X_{s,max}=0.3020 \text{ p.u.}$,发电厂中发电机的台数 $n=3$,基准阻抗 Z_{gn} 为:

$$Z_{gn} = \frac{U_{gn}^2}{S_{gn}} = \frac{24^2}{1111} = 0.518(\Omega)$$

Z_a 、 Z_b 和电抗特性 Z_c 的整定公式分别为:

$$Z_a = \left(X_{s,max} // \frac{X'_d + X_T}{n-1} + X_T \right) \frac{U_{gn}^2}{S_{gn}} = (0.1388 + 0.1314) \times 0.518 = 0.140(\Omega)$$

$$Z_b = -X'_d \frac{U_{gn}^2}{S_{gn}} = -0.382 \times 0.518 = -0.198(\Omega)$$

$$Z_c = 0.9 X_T \frac{U_{gn}^2}{S_{gn}} = 0.9 \times 0.1314 \times 0.518 = 0.0613(\Omega)$$

灵敏角 φ_{sen} 推荐取 $80^\circ \sim 85^\circ$,这里整定为 80° 。

透镜内角 α 的整定:根据工程经验,建议整定为 120° 。

发电机的滑极次数整定:振荡中心在区外时,失步保护动作于信号,滑极次数可整定为 2~15 次;失步保护动作于跳闸,滑极次数整定为大于等于 15 次;振荡中心在发变组内时,1 号、2 号、3 号机组滑极次数分别整定为 2、4、6 次,动作于跳闸。

出口方式的整定:单机运行时,最小、最大运行方式下系统的振荡中心分别为:

$$\frac{X_{s,max} + X_T + X'_d}{2} = 0.3512 \text{ p.u.}$$

$$\frac{X_{s,min} + X_T + X'_d}{2} = 0.2355 \text{ p.u.}$$

故振荡中心在发变组内,保护动作于停机。

2 失步仿真建模

本文根据某电厂单机容量为 1000 MW 的 3 台汽轮机的主接线图 4 及各元件参数,在 PSCAD 软件中建立了与电厂实际参数一致的仿真模型,发电机带有自励磁系统、稳定器和调速器。在 PSCAD 软件中建立的三元件型失步判据仿真模型和等面积预测失步的仿真模型分别如图 5、6 所示。

图 5 中,透镜元件由两同半径的圆的相交部分组成。模块 a 实现测量轨迹在透镜中的延时,模块 b 判断轨迹是否穿过挡板及透镜,模块 c 为轨迹与电抗线比较模块,用来判断区内失步。当模块 a、b、c 三部分同时满足,通过逻辑与门就给由 D 触发器构成的异步计数器(模块 e)1 个计数脉冲实现 1 次滑极计数,最终实现了三元件型的区内失步判断。当滑极次数计满后通过断路器实现出口动作。区外判断由图中的模块 a、b、d 实现。

经过整定计算得到 2 个圆的半径是 0.195Ω ,圆心分别为 $(0.091, -0.0456)$ 、 $(-0.1011, -0.0118)$ 。

图 6 中,模块 1 用于寻找在第 1 振荡周期中功角到达 $\pi - \delta_0$ 的时刻,而模块 2 用于故障切除后通过差分法寻找稳定极限角的时刻。根据模块 1、2 振荡的类型选择模块 3 中积分的上限时刻;失步振荡时积分上限为模块 1 得到的时刻 $\pi - \delta_0$,反之为模块 2 得到的时刻。最终,将输入功率 P_T 与输出功率 P_c 比较,并积分求出面积实现失步的预测。

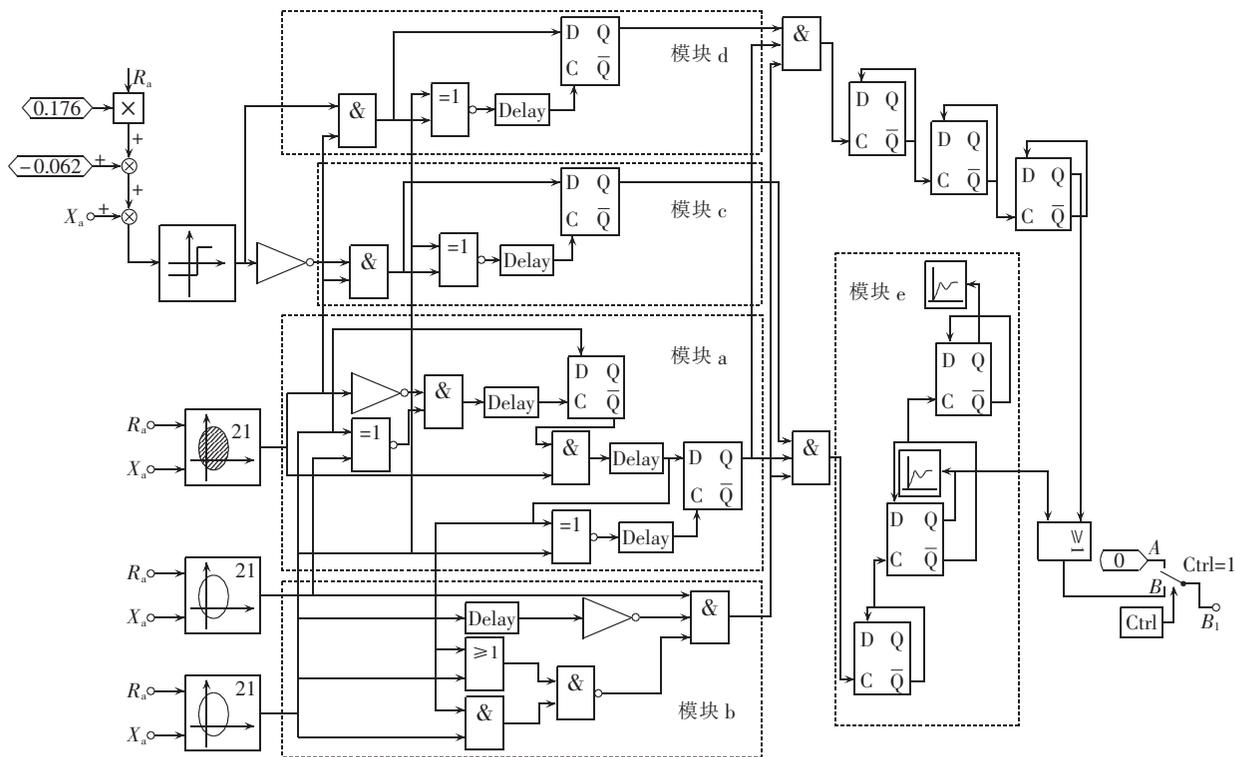


图 5 三元件型失步判据模型

Fig.5 Model of three-component criterion for out-of-step protection

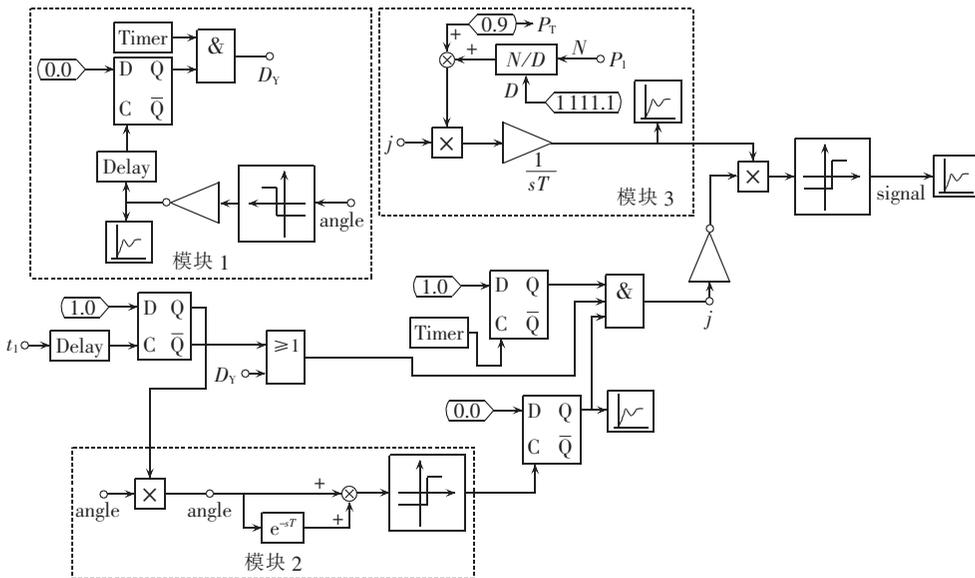


图 6 等面积的失步预测模型

Fig.6 Out-of-step prediction model based on equal area criterion

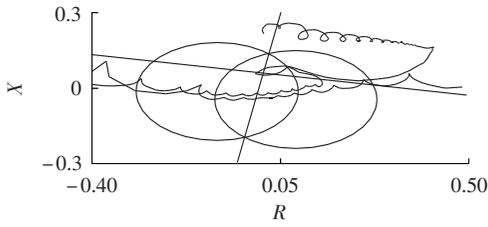
3 失步保护仿真结果

3.1 失步故障时各机组失步保护动作情况

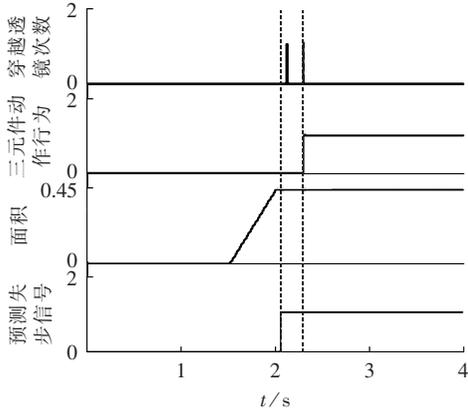
变压器高压侧三相短路,故障 0.5 s 后切除,3 台机组都失步。1 号机机端测量阻抗轨迹如图 7(a)所示,轨迹在透镜中穿越 2 次,然后发电机被三元件型失步判据切除,穿越脉冲和三元件动作行为见图 7(b)。图 7(b)中,积分后的面积(标幺值,后同)大于 0,等面积原则的预测失步信号在第 1 条虚线所示时

刻发出,早于三元件型判据动作时刻(第 2 条虚线所示时刻),有很好的预测性,便于工作人员给发电机采取必要的措施如增减有功、切除部分机组、调相、投电气制动等。

而 2 号和 3 号机组的测量阻抗轨迹分别穿越透镜 4、6 次后也相继被切除。可见发电厂需要给每台发电机配置失步保护,采取不同的滑极次数来实现不同的延时切机,且增加了失步预测可以给电厂争取机组再同步的时间。

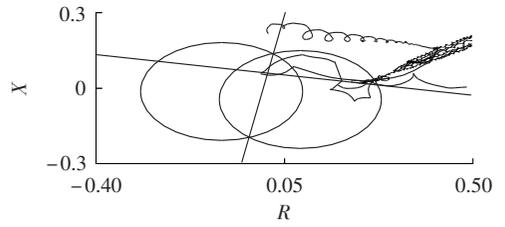


(a) 1号机机端测量阻抗轨迹

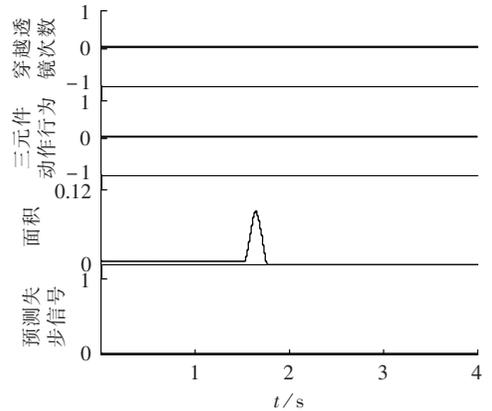


(b) 1号机失步保护动作行为

图 7 失步振荡时阻抗轨迹和失步保护动作情况
Fig.7 Impedance path and operation of out-of-step protection during out-of-step oscillation



(a) 1号机机端测量阻抗轨迹



(b) 1号机失步保护动作行为

图 8 稳定振荡时阻抗轨迹和失步保护动作情况
Fig.8 Impedance path and operation of out-of-step protection during stable oscillation

3.2 稳定振荡时各机组失步保护的动作为

同样在变压器高压侧三相短路故障,0.1 s 后切除,系统发生稳定振荡。

稳定振荡时,各机组机端测得的阻抗轨迹一致,阻抗轨迹基本在第一象限振荡,不会穿越透镜,如图 8(a)所示。图 8(b)中,失步预测模型积分后的面积为 0,失步保护不发失步预测信号也不动作,保证了失步保护具有鉴别稳定振荡和失步振荡的能力。

3.3 1 号机失磁故障时机组失步保护动作行为

仿真时 1 号机在 1.5 s 失磁故障,并为 1 号机加入了由异步圆阻抗、逆无功和转子低电压判据构成的失磁保护^[14-16]。失磁故障中阻抗轨迹如图 9 所示,失磁保护由阻抗判据延时 0.8 s 切机,动作时刻为图 10 中虚线所示时刻。失步保护能准确发失步预测信号(点划线所示时刻)但不动作,如图 10 所示。

如果失磁保护拒动,失步保护作为失磁保护的后备保护能可靠动作。仿真结果如图 11 所示,轨迹在透镜中穿越 2 次后(虚线所示时刻)失步保护动作。

3.4 短路故障时机组失步保护动作行为

在变压器高压侧发生短路故障,如不切除最终会引起发电机失步,失步保护应作为后备可靠动作,以两相短路为例研究其动作行为,仿真时在 1.5 s 发生短路故障且不切除。失步保护的动作为见图 12,一旦反应短路故障的保护拒动,失步保护准确在点划线所示时刻处发失步信号,并在故障持续 1 s 后可投入做其后备而动作,动作时刻为虚线所示时刻。

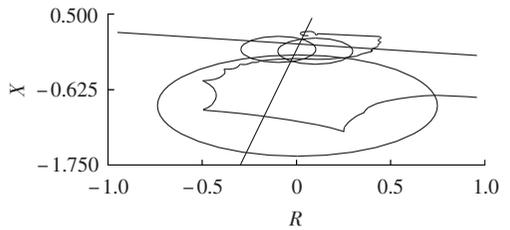


图 9 失磁故障时测量阻抗轨迹

Fig.9 Measured impedance path during loss-of-excitation fault

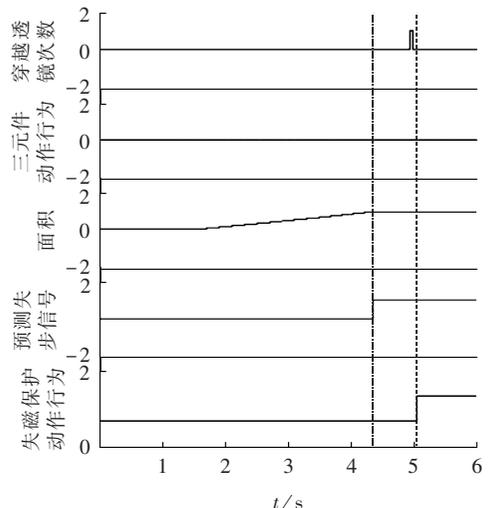
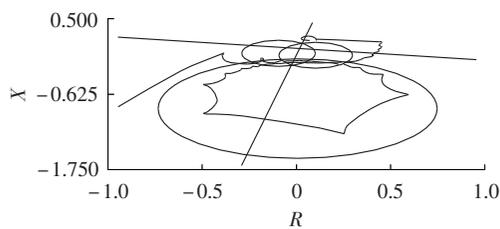
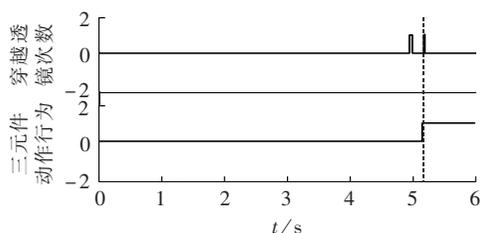


图 10 失步保护和失磁保护动作情况

Fig.10 Operation of out-of-step protection and loss-of-excitation protections



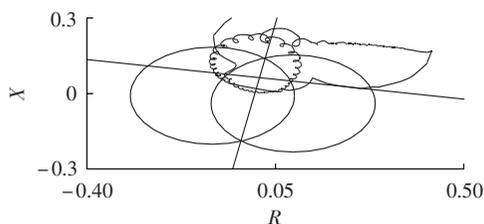
(a) 1号机机端测量阻抗轨迹



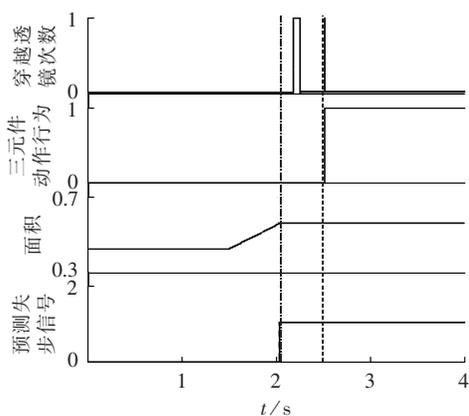
(b) 1号机失步保护动作行为

图 11 失磁保护拒动时阻抗轨迹和失步保护的动作为

Fig.11 Impedance path and operation of out-of-step protection with loss-of-excitation protection misoperation



(a) 1号机机端测量阻抗轨迹



(b) 1号机失步保护动作行为

图 12 短路故障时阻抗轨迹和失步保护的动作为

Fig.12 Impedance path and operation of out-of-step protection with short circuit

4 结论

本文在 PSCAD 软件中建立了某电厂的三机无穷大系统仿真模型,能够真实地模拟该电厂的各种运行情况。在完成了该电厂三机组的失步保护的整定计算后,针对现有失步保护中需增设失步预测功能,提出了等面积原则的失步预测,能为即将失步的机组争取再同步的时间。同时,在 PSCAD 软件中

立的此失步预测与三元件型判据相结合的失步保护仿真模型,仿真结果验证了失步保护整定的正确性,而且能精确地预测不稳定振荡并发出失步信号,且能在各种故障下不误动,通过滑极次数切除由各种故障引起的失步故障,可以用于大型发电机组的失步保护的配置与整定方面的研究。

参考文献:

- [1] 吴继平. 大型机组失磁失步保护性能分析及对电网影响的研究[D]. 南京:东南大学,2009.
WU Jiping. Performance analysis of loss of excitation and out of step protection for large generator and research on its impact on grid[D]. Nanjing:Southeast University,2009.
- [2] 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):1-5.
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):1-5.
- [3] 张冀萍,唐秋实. 失步、振荡对运行发电机及系统的影响及防护措施[J]. 电站系统工程,2010,26(4):65-66.
ZHANG Jiping,TANG Qiushi. Influence of step-out and oscillation at generator and system and preventive measures[J]. Power System Engineering,2010,26(4):65-66.
- [4] 吴启仁. 三峡发电机失步保护及励磁系统应用技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2004.
WU Qiren. The research of application technology of the Three Gorges generator out of step protection and exciting system[D]. Wuhan:Huazhong University of Science & Technology,2004.
- [5] 杨晓东,李国栋. WFBZ-01 型发变组保护的误动分析及改进[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(12):94-98.
YANG Xiaodong,LI Guodong. Misoperation analysis and improvement of WFBZ-01 protection in generation-transformer group [J]. Power System Protection and Control,2009,37(12):94-98.
- [6] 杨莉. 百万千瓦级机组发电机变压器组继电保护配置探讨[J]. 电力自动化设备,2006,26(10):110-113.
YANG Li. Discussion on protection configuration of 1 000 MW generator-transformer unit[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(10):110-113.
- [7] 金玲. 大型发电机组失步保护定值的整定计算分析[J]. 内蒙古电力技术,2009,27(1):23-25.
JIN Ling. Analysis to setting calculation on out of step protection setting value for large generating units[J]. Inner Mongolia Electric Power,2009,27(1):23-25.
- [8] 董恩钊,王祥珩,王维维,等. 汽轮发电机三相短路引起的失步仿真及保护[J]. 继电器,2003,31(9):20-25.
DONG Enzhao,WANG Xiangheng,WANG Weijian,et al. Out-of-step simulation and protection for turbine-generator caused by three phase short-circuit[J]. Relay,2003,31(9):20-25.
- [9] 吴启仁,尹项根. 三峡左岸电站 VGS 水轮发电机组的失步保护[J]. 电力自动化设备,2004,24(11):43-46.
WU Qiren,YIN Xianggen. Out-of-step protection for VGS hydro-generators of Three Gorges Left Bank Power Plant[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(11):43-46.
- [10] 黄立滨,程时杰,陈大鹏,等. RTDS 在发电机失步保护动模测试中的应用[J]. 继电器,2004,32(18):38-42.

- HUANG Libin, CHENG Shijie, CHEN Dapeng, et al. Application of RTDS in dynamic simulation of generator out-of-step protection[J]. Relay, 2004, 32(18):38-42.
- [11] 代莹. 发电机变压器保护原理分析及整定计算软件开发研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2006.
- DAI Ying. Research on principle of generator and transformer protection with development of setting calculation software[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2006.
- [12] PAUDYAL S, RAMAKRISHNA G, SACHDEV M S. Application of equal area criterion conditions in the time domain for out-of-step protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2):600-609.
- [13] PAUDYAL S, RAMAKRISHNA G, SACHDEV M S. Out-of-step protection using the equal area criterion in time domain SMIB and 3-machine case studies[C]//2008 IEEE Region 10 Conference. Hyderabad, India: IEEE, 2008:1-6.
- [14] 王兆鹏. 核电站 1000 MW 级机组的变组保护配置[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6):111-114.
- WANG Zhaopeng. Generator & transformer protection configuration for 1000 MW unit of nuclear power station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6):111-114.
- [15] 徐勇. 统调电厂涉及机网协调保护的整定和设备台帐管理系统[D]. 上海:上海交通大学, 2006.
- XU Yong. Management system of relay setting related to power network and equipment account of unified management plant[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006.
- [16] 梅成林, 尹项根, 张侃君. 中小型发电机失磁保护研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(11):39-42.
- MEI Chenglin, YIN Xianggen, ZHANG Kanjun. Research of excitation-loss protection for medium and small generators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(11):39-42.

作者简介:

王玉龙(1988-), 男, 江苏海安人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定控制(E-mail: wanglonglon@163.com);

王宝华(1968-), 男, 江苏海安人, 副教授, 博士, 研究方向为电力系统分析与非线性控制;

陆桂华(1988-), 女, 江苏扬州人, 工程师, 从事电力系统运行工作;

杨支吉(1986-), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定控制。

PSCAD-based setting calculation and simulation of out-of-step protection for large units

WANG Yulong¹, WANG Baohua¹, LU Guihua², YANG Zhiji¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Yizheng Power Supply Company, Yizheng 211400, China)

Abstract: A criterion composed of a lens-type and two straight-line-type impedance components is proposed for the out-of-step protection and its operational characteristic is given. The out-of-step prediction based on the equal area criterion is introduced and the setting calculation of out-of-step protection is carried out. The simulation models are built with PSCAD for the infinite system with three 1000 MW machines, the three-component criterion and the out-of-step prediction based on equal area criterion. Simulative results show that, the principle proposed for the out-of-step protection is correct and reliable; the unstable oscillation is precisely predicted with the out-of-step signal and the faulty unit is tripped by counting the sliding pole number; and there is no misoperation during stable oscillation.

Key words: electric power system protection; out-of-step oscillation; sliding pole number; equal area criterion; setting; computer simulation

研华 SUSIAccess 助力构建智能系统

作为嵌入式平台和智能系统服务商, 研华科技(2395.TW)宣布将推出新版 SUSIAccess, 这是一款预先加载至研华嵌入式产品的创新型远程设备管理软件。SUSIAccess 2.1 整合了 Intel 的主动管理技术(AMT)和 Clickatell 的 SMS 网管服务, 能够实现高效的远程管理、监控及维护, 降低客户的运营成本。SUSIAccess 2.1 的发布将为系统集成商提供更加灵活的选择, 便于构建智能、互连的嵌入式计算解决方案。

(研华科技股份有限公司)

