

基于振荡边界圆的失磁保护新判据研究

鹿伟, 王增平, 郑涛, 俞隽亚

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 提出了一种新的失磁保护判据——振荡边界圆判据, 来解决传统的失磁保护阻抗元件无法区分失磁与振荡这一问题。推导了发生振荡时机端阻抗轨迹的方程, 经过分析得到系统发生低励磁振荡时, 低励程度越深, 机端阻抗轨迹圆越小, 并且形成包含关系。根据这一结论, 提出振荡边界圆判据, 当机端测量阻抗轨迹进入振荡边界圆内, 认为发生了失磁故障, 保护直接动作, 通过仿真验证了该判据的正确性。针对振荡边界圆判据, 提出了一套新的失磁保护方案, 并通过实例分析, 验证了新失磁保护方案的有效性。

关键词: 振荡边界圆; 阻抗轨迹; 发电机失磁; 系统振荡; 保护方案; 仿真

Research on a novel loss of excitation protection criterion based on impedance circle of oscillatory boundary

LU Wei, WANG Zengping, ZHENG Tao, YU Junya

(State Key Laboratory of New Energy Power System, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: This paper proposes a new loss-of-excitation (LOE) protection criterion, namely the impedance circle of oscillation boundary criterion, to solve the problem that traditional LOE protection impedance unit cannot distinguish LOE from oscillation. Firstly, the equation of impedance trajectory at generator terminal is established, and based on the equation, through the analysis, the conclusion can be drawn that when low excitation oscillation occurs, the deeper the extent of low excitation is, the smaller the impedance circle at generator terminal becomes, and the smaller circle is included in the bigger one. Then according to that conclusion, the impedance circle of oscillation boundary criterion is proposed. When the impedance trajectory measured at generator terminal enters into the impedance circle of oscillation boundary, loss-of-excitation is thought to occur and the protection devices act directly. Based on the impedance circle of oscillation boundary criterion, a new loss-of-excitation protection scheme is proposed and the effectiveness of the scheme is verified by the specific test case.

Key words: impedance circle of oscillation boundary; impedance trajectory; loss-of-excitation; system swing; protection scheme; simulation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0007-07

0 引言

发电机失磁, 是发电机常见故障形式, 尤其对大型机组, 励磁系统环节较多, 失磁故障概率增加。统计数据表明, 励磁故障约占发电机总故障的60%以上^[1-3]。因此, 更深入地研究发电机励磁故障特征, 提高发电机励磁保护与控制水平, 对保证机组本身和电力系统的安全稳定具有十分重要的学术意义与工程实用价值。

现有的失磁保护是把主辅判据通过一定的逻辑

关系组合起来实现优势互补, 使误动概率减小到最低程度^[4-17]。但是无论如何优化组合, 为了区分失磁和振荡, 均要通过延时元件实现。由于我国电网结构日益紧密, 振荡周期变长, 导致失磁保护延时较长, 不利于快速排除故障^[18]。

阻抗元件是发电机失磁保护应用最为广泛的判据, 通过测量机端阻抗轨迹实现故障判别^[19]。本文对系统振荡时机端测量阻抗轨迹进行了深入分析, 通过对比失磁与振荡时机端测量阻抗轨迹的不同, 提出了一种新的失磁保护判据。

1 系统振荡机端测量阻抗轨迹

以图 1 所示的双侧电源的电力系统为例，分析系统振荡时机端测量阻抗轨迹。

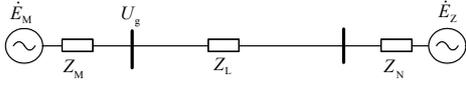


图 1 双侧电源系统等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of bilateral power supply system

系统两侧等效电动势为 \dot{E}_M 和 \dot{E}_N ，等效电源之间的阻抗为 $Z_\Sigma = Z_M + Z_L + Z_N$ ，分别为 M 侧系统的等值电抗，N 侧系统的等值电抗以及联络线路的阻抗。两侧等效电动势关系为

$$\frac{\dot{E}_N}{\dot{E}_M} = ke^{-j\delta} \quad (1)$$

则 M 侧机端测量阻抗表示为

$$Z = \frac{\dot{E}_M - iZ_M}{i} = \dot{E}_M / \frac{\dot{E}_M - \dot{E}_N}{Z_\Sigma} - Z_M = \frac{1}{1 - ke^{-j\delta}} Z_\Sigma - Z_M \quad (2)$$

设 $1/(1 - ke^{-j\delta}) = a + jb$ ，可得

$$ke^{-j\delta} = \frac{a + jb - 1}{a + jb} \quad (3)$$

由式(3)整理可得

$$(1 - k^2)a^2 - 2a + 1 + (1 - k^2)b^2 = 0 \quad (4)$$

当 $k=1$ 时， $a=1/2$ ，表示轨迹为一条直线；当 $k \neq 1$ 时，有

$$\left(a + \frac{1}{k^2 - 1}\right)^2 + b^2 = \left(\frac{k}{k^2 - 1}\right)^2 \quad (5)$$

这是一个标准的圆的方程。 k 取不同值，表示的轨迹如图 2 所示。

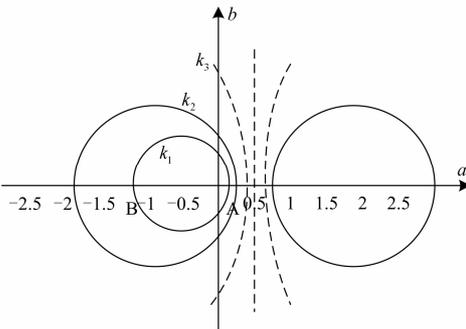


图 2 k 取不同值式(5)表示的轨迹

Fig. 2 Trajectory of equation (5) according to k

以 M 侧为研究对象，当 $k=1$ 时，称为等励磁振荡； $k < 1$ 时，为高励磁振荡； $k > 1$ 时，为低励磁

振荡。低励磁振荡与失磁故障特性最为相似，因此主要对低励磁振荡情况进行分析。

低励磁振荡时式(5)对应的圆与横轴交于 A、B 两点。两点的坐标分别为 $(1/(k+1), 0)$ 和 $(-1/(k-1), 0)$ 。又因为 $k > 1$ ，因此随着 k 值的增加，两交点均向原点靠近。反映在图 2 中有 $k_1 > k_2 > k_3$ 。根据式(2)对 $1/(1 - ke^{-j\delta})$ 的轨迹进行变换，可得到系统振荡时 M 侧的机端测量阻抗轨迹。变换只是对图 2 中所示的圆轨迹进行位置和幅值的变化，并不改变圆的特性。因此，可以得到结论：系统发生低励磁振荡时，低励的程度越深，机端测量阻抗轨迹圆周越小，并且形成包含关系。

通过上述分析，我们可以从另一个角度对失磁故障进行判别。因为发电机本身失磁失步而造成的异步运行状态也是低励磁振荡的一种，在这种低励磁振荡中失磁保护阻抗元件应该动作；除此之外，其他一切类型的低励磁振荡，要求失磁保护不误动。系统发生振荡时， $|\dot{E}_M / \dot{E}_N|$ 有最小值 k' ，若比值再小即认为发生了失磁故障。因此，式(5)中，可以取 $k_{\max} = 1/k'$ ，得到的圆轨迹即为系统振荡的临界圆。实际中， k' 通常按 0.65~0.75 考虑^[20]，此时可取 $k_{\max} = 1.5$ 。确定了 k_{\max} ，可得到按式(2)求得的系统振荡时 M 侧机端测量阻抗轨迹边界，如图 3 所示。当机端测量阻抗轨迹进入圆内时，则判断发电机发生失磁故障。

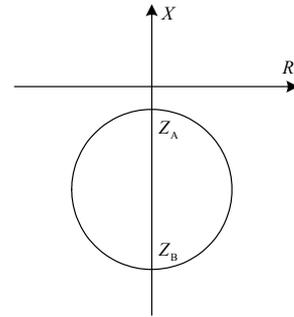


图 3 系统振荡边界阻抗圆轨迹

Fig. 3 Impedance boundary circle under power swing

图 3 表示的圆轨迹为忽略了线路中电阻后得到，其中， Z_A 、 Z_B 值为

$$Z_A = \frac{1}{k_{\max} + 1} Z_\Sigma - Z_M \quad (6)$$

$$Z_B = -\frac{1}{k_{\max} - 1} Z_\Sigma - Z_M \quad (7)$$

发电机与系统之间振荡时，发电机的同步电抗近似等于暂态电抗 x'_d ，式(6)、式(7)中 Z_M 取 x'_d 。

2 发电机失磁保护新判据

由上一节的分析可知, 采用图 3 所示的振荡阻抗边界圆作为失磁保护的判别元件, 能够躲过系统全相振荡的影响。因此, 只需设置一个 0.2 s 的短延时即可, 该延时是为了躲开短路切除等暂态过程的影响。但是, 当系统发生非全相振荡时, 机端测量阻抗轨迹有可能进入振荡边界圆。该结论通过计算非全相运行状态下机端测量阻抗来证明, 因计算过程比较复杂, 此处不再详述。因此, 需要添加一个负序电压闭锁元件, 躲过非全相振荡的影响。同时, 增设负序电压闭锁元件还能够保证系统发生短路故障时不误动。

另外, 按该方法整定, 保护的動作圆范围会缩小, 这样阻抗元件的動作圆不能把稳态异步运行中机端测量阻抗与转差率关系的曲线全部包括进去, 致使当发电机带轻负荷时发生全失磁故障达到稳定异步运行后, 失磁保护可能会拒动。但是, 发电机轻载运行情况下发生失磁故障时对发电机和系统造成的危害较小, 允许异步运行一段时间, 因此, 针对不同的运行状况, 可以采用分级跳闸策略, 仍保留异步边界圆判据与时间元件的组合, 相当于作为振荡边界圆的后备保护。当振荡边界圆不发出动作指令的情况下, 异步边界圆判据也能动作, 只是需要经过较长的延时躲过系统振荡的影响。综上所述, 提出新的发电机失磁保护方案, 如图 4 所示。

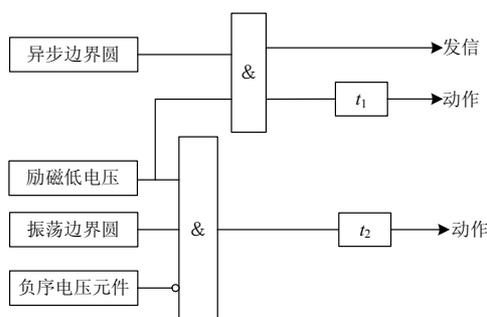


图 4 基于振荡边界圆判据的失磁保护方案

Fig. 4 Loss of field protection scheme based on oscillation boundary circle criterion

时间元件 t_1 的作用是躲过系统振荡的影响, 取为 1.5 s; 时间元件 t_2 的作用是躲开短路切除等暂态过程的影响, 取为 0.2 s。

3 仿真验证

图 5 为云南省某地区电网电力系统接线图, 以昆明市厂口乡一 600 MW 发电机为研究对象, 对新的失磁保护判据动作特性进行仿真分析, 失磁机经

变压器与线路联接到无穷大系统。其中, 600 MW 机组以及线路的部分参数如表 1 所示。

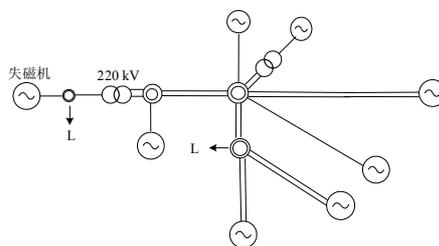


图 5 仿真系统接线图

Fig. 5 Schematic diagram of simulation system

表 1 600 MW 机组与线路参数

Table 1 Parameter of 600 MW generator and electric power line

参数	数值	参数	数值
U	20 kV	x'_d	0.275 1
I	10.189 kA	x''_d	0.198 5
T_j	3.725 5 s	x_s	0.170 7
x_d	1.892 9	x_t	0.14

根据式(6)、式(7)计算振荡边界圆与纵轴交点, 取 $k=1.5$, 可得两交点坐标分别为(0, -0.096 78)和(0, -1.166 7)。异步边界圆与纵轴的交点坐标分别为(0, -0.198 5)和(0, -1.892 9)。图 6 为系统发生高励磁振荡时机端测量阻抗轨迹; 图 7 和图 8 为发生低励磁振荡时机端测量阻抗轨迹, 并且图 8 对应系统发生低励程度更深; 图 9 为发电机带 85%额定负荷下 0 s 发生失磁故障时机端测量阻抗轨迹; 图 10 则为发电机带 35%额定负荷下 0 s 发生失磁故障时机端测量阻抗轨迹。

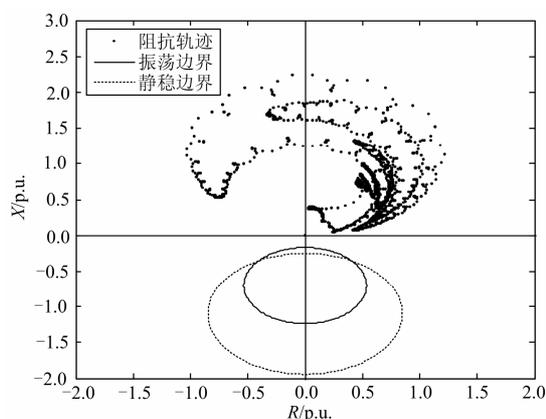


图 6 高励磁振荡机端测量阻抗轨迹

Fig. 6 Impedence trajectory under power swing when high excitation

(1) 由图 6 可知, 当发生高励磁振荡时, 机端测量阻抗轨迹在横轴上方, 不能进入振荡边界圆与异步边界圆中, 可靠不动作。发生等励磁振荡时, 两

阻抗圆判据也可靠不动作。

(2) 由图 7、图 8 可知, 发生低励磁振荡时, 机端测量阻抗轨迹有可能进入异步边界圆范围内, 并且低励的程度越深, 振荡轨迹在异步边界圆内滞留时间越长。随着低励程度加深, 振荡轨迹虽然逐渐靠近振荡边界圆, 但无法进入圆内。该仿真结果也证明了振荡边界圆判据能够躲过系统振荡的影响。

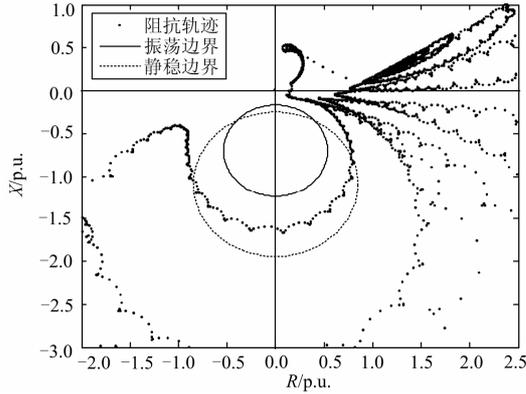


图 7 低励磁振荡机端测量阻抗轨迹

Fig. 7 Impedance trajectory under power swing when low excitation

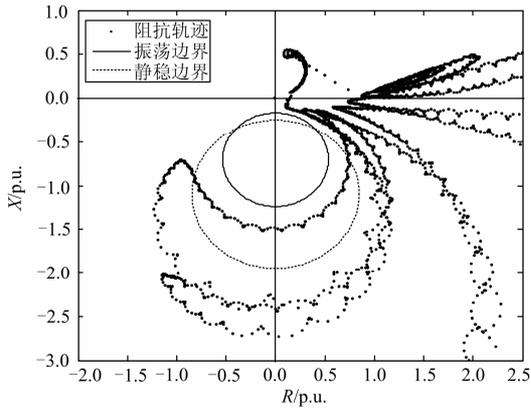


图 8 深度低励磁振荡机端测量阻抗轨迹

Fig. 8 Impedance trajectory under power swing when deep low excitation

(3) 由图 9、图 10 可知, 当重负荷下发生失磁故障时, 机端测量阻抗轨迹能够可靠进入振荡边界圆与异步边界圆内, 并且进入时间相差很小。当轻负荷下发生失磁故障时, 机端测量阻抗轨迹进入异步边界圆后经过较长时间才能进入振荡边界圆, 甚至无法进入, 此时, 失磁故障将通过异步边界圆加时间判据检测出来。根据上述逻辑, 对于发电机重负荷与轻负荷运行工况, 形成失磁保护分级跳闸方案, 具有更好的适应性。

表 2 是发生完全失磁故障时采用图 4 所示的失磁保护方案与采用传统的失磁保护方案性能对比。

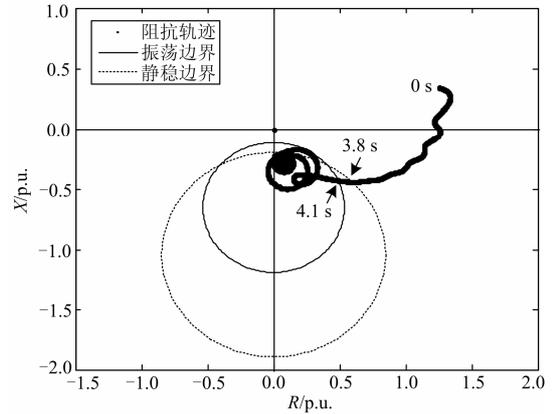


图 9 重负荷下失磁阻抗轨迹

Fig. 9 Impedance trajectory of loss-of-excitation under heavy load

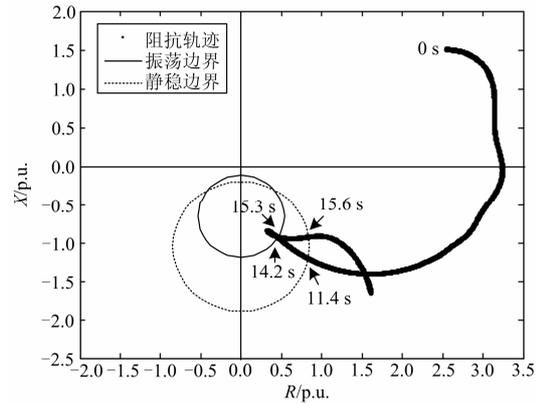


图 10 轻负荷下失磁阻抗轨迹

Fig. 10 Impedance trajectory of loss-of-excitation under light load

表 2 完全失磁时两种保护方案仿真结果

Table 2 Simulation results of two kinds of protection schemes under complete loss-of-excitation

完全失磁	发信/动作时间/s	
	传统判据	新判据
100% P_N	3.1/4.6	3.1/3.3
90% P_N	3.3/4.8	3.3/3.6
80% P_N	3.8/5.3	3.8/4.3
70% P_N	4.4/5.9	4.4/5.0
60% P_N	5.3/6.8	5.3/6.0
50% P_N	6.3/7.8	6.3/7.3
40% P_N	7.7/9.2	7.7/9.2
30% P_N	11.4/12.9	11.4/12.9

表 2 列出了发生完全失磁故障时发电机带不同额定负荷下两种失磁保护方案的发信时间与动作时间, 因为新的保护方案仍以阻抗轨迹到达异步边界圆作为发信标志, 因此两种判据发信时间相同, 但

新的失磁保护方案动作时间具有明显的优势, 并且发电机在重负荷下运行, 这种优势更加明显, 能够更快地判断出发生失磁故障, 进而实施减出力、切换励磁、切机等操作, 减小失磁故障造成的损害。为更直观地显示新的失磁保护方案的时间优势, 将两种保护方案动作时间以柱状图的形式表示, 如图 11 所示。图 12 为不同运行情况下发电机机端测量阻抗轨迹, 表明了发电机带重负荷运行时, 失磁阻抗轨迹进入异步边界圆与振荡边界圆的区域相近, 而在轻负荷下, 相距较远, 这一规律对图 11 所示的两种保护方案动作时间的变化特性进行了解释。

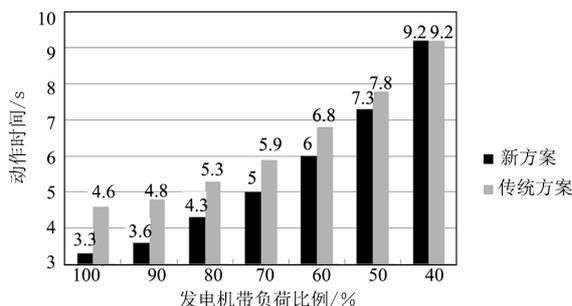


图 11 完全失磁时两种保护方案动作时间

Fig. 11 Actuation time of two kinds of protection schemes under complete loss-of-excitation

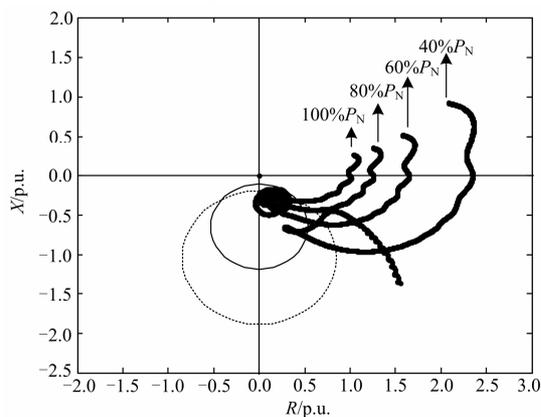


图 12 发电机带不同负荷发生完全失磁时阻抗轨迹

Fig. 12 Impedance trajectory of complete loss-of-excitation under different loads

表 3 是发生部分失磁时新失磁保护方案与传统的失磁保护方案性能对比, 设定剩磁系数为 30%。

图 13 为表 3 所示部分失磁故障时两种保护方案动作时间直观图, 可知动作时间变化规律与完全失磁时相似, 只是动作时间整体变慢。图 14 为部分失磁时不同运行情况下发电机机端测量阻抗轨迹, 其变化特性与完全失磁相似, 但此时发电机异步运行之后振荡幅度增大, 造成更严重的损害, 因此, 新的失磁保护方案在重负荷下失磁时检测到异步

运行能够迅速动作这一特性具有更加重要的意义。

表 3 部分失磁时两种保护方案仿真结果

Table 3 Simulation results of two kinds of protection schemes under partial loss-of-excitation

不完全失磁	发信/动作时间/s	
	传统判据	新判据
100% P_N	3.8/5.3	3.8/4.0
90% P_N	4.4/5.9	4.4/4.7
80% P_N	5.3/6.8	5.3/5.8
70% P_N	6.3/7.8	6.3/7.0
60% P_N	8.0/9.5	8.0/9.1
50% P_N	10.8/12.3	10.8/12.3
40% P_N	15.8/17.3	15.8/17.3

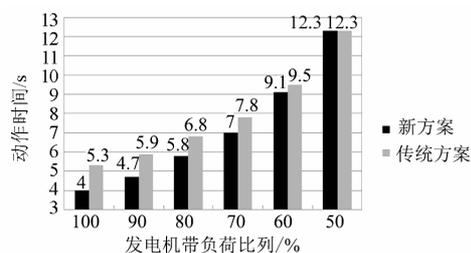


图 13 部分失磁时两种保护方案动作时间

Fig. 13 Actuation time of two kinds of protection schemes under partial loss-of-excitation

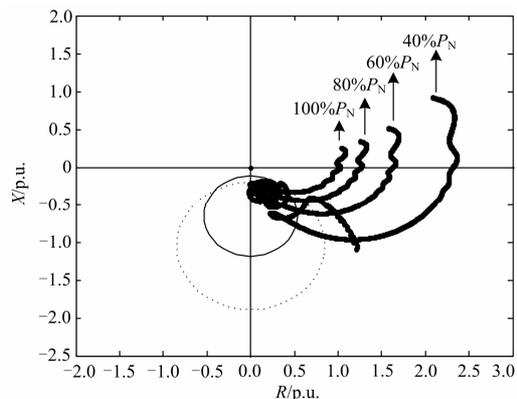


图 14 发电机带不同负荷发生部分失磁时阻抗轨迹

Fig. 14 Impedance trajectory of partial loss-of-excitation under different loads

当系统发生振荡时, 由图 6~图 8 可知新的失磁保护方案能够躲过振荡的影响, 可靠不动作; 当发生短路故障时, 由于有负序电压闭锁元件, 保护不误动。

综上所述, 发电机带重负荷下发生失磁故障时, 新的失磁保护方案能够快速动作, 减小失磁故障对发电机和系统造成的危害; 发电机带轻负荷下发生失磁故障时, 危害相对较小, 两种保护方案动作时

间相同；系统在其他非失磁工况下，新的失磁保护方案均能可靠不动作。

4 结论

本文对系统发生振荡时机端测量阻抗轨迹进行了深入分析，通过对比发生振荡与失磁故障时机端测量阻抗轨迹的不同，提出了振荡边界圆判据。新的失磁保护判据理论上能够不依靠延时躲过系统振荡的影响，在保证选择性的同时，提高了保护的速动性。仿真结果表明，新的失磁保护方案性能可靠，优点突出，值得应用和推广。

参考文献

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] 高春如. 大型发电机组继电保护整定计算与运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 王成亮, 王宏华, 向昌明, 等. 发电机进相能力的RBF神经网络模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 124-129. WANG Chengliang, WANG Honghua, XIANG Changming, et al. Generator leading phase ability model based on RBF neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 124-129.
- [4] 刘一丹, 张小易, 崔晓洋. 火电厂发电机失磁保护阻抗判据的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 235-237. LIU Yidan, ZHANG Xiaoyi, CUI Xiaoxiang. Discussion of thermal power plant generator resistance criterion for loss of excitation protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 235-237.
- [5] 张旭东. 不同原理发电机失磁保护误动分析与改进[J]. 电力系统自动化, 2003, 32(6): 63-65. ZHANG Xudong. Analysis of misoperation of protection for loss of excitation and its improvement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 32(6): 63-65.
- [6] 郭自刚, 陈俊, 陈佳胜, 等. 大型水电机组保护若干问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 148-151. GUO Zigang, CHEN Jun, CHEN Jiasheng, et al. Discussion on some problems of large hydroelectric unit protection[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 148-151.
- [7] 王凤翔. 永磁电机在风力发电系统中的应用及其发展趋势[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 12-25. WANG Fengxiang. Application and development tendency of PM machines in wind power generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 12-25.
- [8] 殷建刚, 彭丰, 杨平, 等. 发电机失磁保护中系统低电压判据的探讨[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(12): 28-31. YIN Jiangan, PENG Feng, YANG Ping, et al. Discussion on low voltage criterion in field-loss protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(12): 28-31.
- [9] 陆秋榆, 徐飞, 胡伟, 等. 考虑机网协调的新型发电机失磁保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 1-6. LU Qiuyu, XU Fei, HU Wei, et al. New loss of excitation protection scheme based on coordinated optimization between generator and grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 1-6.
- [10] 孙显初. 对汽轮发电机失磁保护出口方式的探讨[J]. 继电器, 2006, 34(22): 78-80. SUN Xianchu. Discussion on trips way of the loss of field of steam turbine generator[J]. Relay, 2006, 34(22): 78-80.
- [11] 田丰, 李碧辉, 王伟. 含有U_L-P型转子低压失磁继电器失磁保护框图的优化[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 49-51. TIAN Feng, LI Bihui, WANG Wei. Optimization of loss of field protection diagram based on U_L-P[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 49-51.
- [12] DE MORAIS A P, JR CARDOSO G, MARIOTTO L. An innovative loss-of-excitation protection based on the fuzzy inference mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2197-2204.
- [13] 魏燕, 高有权. 发电机失磁保护及其出口方式研究[J]. 继电器, 2003, 31(2): 54-56. WEI Yan, GAO Youquan. Research on generator's loss of field protection and its trip way[J]. Relay, 2003, 31(2): 54-56.
- [14] REIMERT D. Protective relaying for power generation systems[J]. Boca Raton: CRC Press, 2006: 321-355.
- [15] ANDERSON P M. Power system protection[M]. New York: IEEE Press/McGraw-Hill, 1998.

- [16] 林莉, 牟道槐, 孙才新, 等. 同步发电机失磁保护的改进方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(22): 88-92.
LIN Li, MOU Dao huai, SUN Caixin, et al. Improvement on loss-of-excitation protection of synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(22): 88-92.
- [17] 李哲, 季学军, 王祖光. 基于发电机功率变化量的失磁保护辅助加速判据[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 54-56.
LI Zhe, JI Xuejun, WANG Zuguang. An auxiliary accelerated judgment method for loss of excitation protection based on generator power variation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 54-56.
- [18] 隋佳音, 毕天姝, 薛安成, 等. 新型发电机失磁保护加速判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 69-73.
SUI Jiayin, BI Tianshu, XUE Ancheng, et al. A novel accelerated criterion for loss of field protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 69-73.
- [19] 季学军, 刘宏博, 姜玉磊, 等. 阻抗原理发电机失磁保护的改进[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 74-76.
JI Xuejun, LIU Hongbo, JIANG Yulei, et al. Improvements of loss of field protection of impedance principles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(18): 74-76.
- [20] 姚晴林. 同步发电机失磁及其保护[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.

收稿日期: 2014-04-21; 修回日期: 2014-06-09

作者简介:

鹿伟(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与安全控制; E-mail: ncepulw_2011@163.com

王增平(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化、继电保护、变电站综合自动化;

郑涛(1975-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护。