

基于涉网保护的励磁限制、失磁保护与失步保护配合的研究

刘桂林¹, 宋玮¹, 宋新立²

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 网源协调中发电机组涉网保护问题对电网运行和发电厂涉网设备运行的影响日益显著。对实际电厂中励磁限制、进相能力和失磁保护整定不合理的问题进行了明确的阐述, 提出了它们之间的整定配合原则。在电力系统继电保护中, 失磁保护是最重要、最复杂的保护之一, 失磁保护与失步保护都是采用测量阻抗的变化规律作为动作的判据, 在阻抗平面上存在重叠动作区域, 因此两者在配合上存在冲突。由于功角能够实时测量, 在线整定, 具有自适应的特性, 提出了基于功率角闭锁的方法来解决发生失步时失磁保护可能抢先误动的问题。通过仿真验证了上述结论的正确性。

关键词: 涉网保护; 励磁限制; 进相能力; 失磁保护; 失步保护; 自适应性

Research on coordination of low excitation limit, loss of excitation protection and out-of-step protection based on grid-related protection

LIU Gui-lin¹, SONG Wei¹, SONG Xin-li²

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In the coordination of power source and grid, the issues of grid-related protection of generator will exert an increasing significant on running of power grid and network equipment. For the unreasonable setting problems of low excitation limit, phase advance capacity and loss excitation, coordination principles among them are provided. In power system protection, the loss of excitation protection is one of the most important and complex protections. Loss of excitation protection and out-of-step protection both use the variation of the measured impedance as the operation criterion of the operation, and there is an overlap operation area in the impedance plane, so loss of excitation protection and out-of-step protection exist confliction in coordination. For the measurement of power angle is real-time, on-line, and automatic adaptive, a method of solving loss excitation protection and out-of-step protection is provided based on the power angle locking. Simulation verifies the correctness of the conclusion.

Key words: grid-related protection; low excitation limit; phase advance capacity; loss excitation protection; out-of-step protection; automatic adaptive

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0107-06

0 引言

由于电力体制改革改变了过去垂直一体化的管理模式, 发电侧的独立性和自由性大为增加, 如果系统结构不合理, 则应该在系统设计上进行改善, 除此之外, 为了确保电网和机组的安全稳定运行, 应进一步加强发电机组涉网保护与网源协调的管理工作。发电机组的涉网保护是指在发电机组的保护和控制装置中, 动作行为和参数设置与电网运行方

式相关、或需要与电网中安全自动装置协调配合的部分, 主要包括发电机组失磁保护、失步保护、汽轮机超速保护控制、频率异常保护、过激磁保护、定子过电压保护、定子低电压保护和电厂重要辅机保护等, 其动作之后会对电网的安全稳定运行造成重大影响。同时, 随着大容量机组的不断投入运行, 这些机组的运行状况将直接影响到电网的稳定性。依据《DL755—2001.电力系统安全稳定导则》、《DL/T 723—2000.电力系统安全稳定控制技术导则》和《DL/T 1040—2007.电网运行准则》统筹考虑发电机组的性能和电网的需求, 提高网源协调水

基金项目: 国家电网公司科技项目(XT71-12-009)

平对电网抗风险能力以及涉网保护的配合整定具有重要的意义。

为了更好地保障发电机和系统的安全运行，作为发电机的后备保护，失磁保护和失步保护只有在主保护感受不到由于系统冲击造成发电机异常时才动作，是针对主保护动作之外的小概率事件而设定的后备保护。实际运行的电厂中存在着许多机组低励、失磁、失步配合整定不合理的问题。文献[1]分析了在阻抗平面上，低励限制与失磁保护存在着交叉不合理配合现象。文献[2]为防止失磁保护误动，提出了一种计及网源协调的新型失磁保护方案。文献[3]提出了根据低励限制的静态性能应与失磁保护协调配合的原则来设置低励限制线。文献[4]解决了失磁保护在速动性和选择性方面的难题。文献[5]采用低电流辅助判据完善失磁保护方案，缺乏准确性和自适应性。文献[1,6-7]对发电机低励限制与失磁保护或失磁保护与失步保护的配合整定关系进行了讨论。但是在分析失磁保护时，很少有文献从协调配合的角度进行深入研究，统筹考虑低励限制、进相能力、失磁保护和失步保护的配合关系，给出它们的具体配合关系图，缺乏全面性和严谨性。文献[8-10]讨论了发电机失磁保护和失步保护的协调，但给出的两种解决方案，均是基于失磁阻抗保护。两种方案中不管是削去失磁阻抗的左半圆还是在第三象限通过判断阻抗的变化来防止失磁保护误动，均不能满足系统实际运行中异步阻抗圆自适应系统的运行变化。异步阻抗圆实质反应吸收无功量的边界条件，所对应的保护是在一定的电压下以吸收无功量作为动作条件的保护。因此，采用这两种方案的失磁保护的不足之处在于只要在该电压下吸收的无功量大于整定值，则进入该圆动作，而不能完全避免失磁保护的误动作。

在对发电机失磁过程进行深入研究的基础上，本文统筹考虑低励限制、进相能力、失磁保护与失步保护，研究给出它们之间具体的配合关系。由于功率角是直接反应发电机失磁、失步的电气量，分析从失磁到失步的过程，提出采用直接测量功角的方法，通过功角闭锁来解决失磁保护抢先动作的问题，提高了对发电机保护和控制的灵活性。

1 同步发电机低励限制、失磁和失步的分析

工作于低励限制区的发电机存在以下问题：(1)

发电机定子端部铁芯由于漏磁的增大而发热增加，有可能超过最大允许温度；(2) 如果进相较深，励磁电流过小，很有可能越过静稳极限，破坏稳定性；(3) 增大了失磁保护误动的可能性。作为励磁调节系统的辅助功能，低励限制器若检测到励磁水平低于允许条件时会产生控制作用去增加励磁电流使机组返回到稳定运行状态。如果低励限制无效，则失磁保护应动作切除发电机。由于失磁是失步的充分不必要条件，即失磁保护最终导致失步，但并非所有的失步均是由失磁造成的；所以从某种意义上可将失磁保护视为失步保护的后备。

为了更好地研究它们之间的配合关系，图 1 给出了在阻抗平面上隐极发电机从失磁到失步的过程中三个阶段对应的阻抗圆轨迹：失步前功角 $\delta < 90^\circ$ 时的等有功圆阶段；临界失步功角 $\delta = 90^\circ$ 时的静稳极限圆阶段；异步运行功角 $\delta > 90^\circ$ 时的异步阻抗圆阶段。

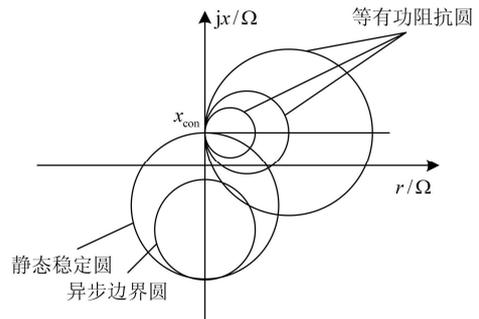


图 1 发电机失磁过程对应的阻抗圆

Fig. 1 Loss of excitation process corresponding to impedance circle

由图 1 可知，由于系统电抗 X_{con} 随系统的运行方式而变化，机端测量到的等有功圆可能与失磁保护圆相交，则机组进相运行时失磁保护可能误动作。

2 低励限制与失磁保护动作特性的配合

2.1 动作特性的配合原则

根据《DL/T 746-2012.同步发电机进相实验导则》，进相运行属于发电机正常运行范畴的特殊运行方式，大型发电机组应当具备按照电网需求随时进相的能力，以便为系统提供良好的动态无功储备，确保电压质量和经济运行。发电机的进相能力需要通过现场试验获得合理的进相额度，其大小受机端电压和电网功角稳定、定子铁芯、静态稳定极限、定子端部温升的影响；因此发电机的进相能力不应越过机组的静态稳定极限。当发电机的无功功率小

于给定的最小容许无功功率时, 励磁限制器应输出一个增励信号, 增加发电机的励磁使发电机的无功增加。《DL/T 650-1998. 中华人民共和国电力行业标准》、《DL/T 843-2003. 大型汽轮发电机交流励磁机励磁系统》和文献[11]对失磁保护的设计指出, 在励磁电流过小或失磁时, 励磁限制应首先动作; 如果未起到限制作用, 则应切换到备用通道, 若切换到备用通道仍未起到限制作用, 则应由失磁保护动作。

《DL/T 650-1998. 中华人民共和国电力行业标准》指出励磁限制动作曲线是按发电机不同有功功率静稳极限及发电机端部发热条件确定的; 《DL/T 843-2003. 大型汽轮发电机交流励磁机励磁系统》如果没有规定励磁限制动作曲线, 一般可按照有功功率 $P = S_n$ 时, 允许无功功率 $Q = -0.05Q_n$, 及 $P = 0$ 时, $Q = -0.3Q_n$ 两点来确定励磁限制动作曲线。

发电机从低励或失磁到失稳或失步时, 机端测量阻抗和功率都将先进入低励限制区, 然后过渡到静稳圆, 因此发电机在进相运行时, 发电机的励磁限制曲线、进相能力曲线和失磁保护应协调配合。配合原则应遵循: 低励失磁时励磁限制应首先动作, 但是由于进相能力是发电机允许进相的边界曲线, 因此励磁限制线应根据进相试验结果确定, 不能越过进相能力曲线; 若励磁限制未起到限制作用, 则在考虑一定裕度下失磁保护动作。

失磁保护的静态稳定圆和异步阻抗圆均在 R-X 平面上, 式 (1)、式 (2) 给出了 R-X 平面与 P-Q 平面的对应关系。根据式 (3) ~ 式 (11) 可将静稳圆和异步圆转化至功率平面上。图 2 给出了励磁限制、进相能力和失磁保护在功率平面上的配合关系。可见发生低励时, 励磁限制优先动作, 但不能越过进相能力曲线, 失磁保护作为励磁限制的后备。配合关系符合本节提到的配合原则。

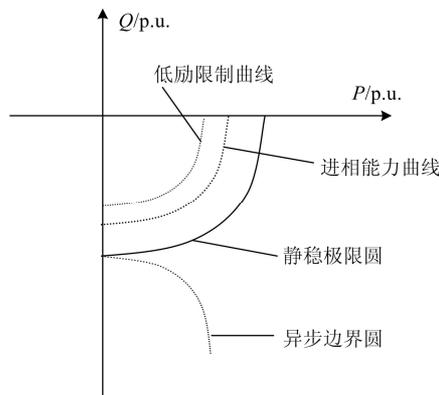


图 2 进相能力、励磁限制及失磁保护配合关系

Fig. 2 Coordination relation of phase advance capacity, low excitation limit and loss protection

$$P = \frac{U^2 R}{R^2 + X^2} \quad (1)$$

$$Q = \frac{U^2 X}{R^2 + X^2} \quad (2)$$

设阻抗圆的动作方程为

$$(R - a)^2 + (X - b)^2 < r^2 \quad (3)$$

由于 $R = U \cos \varphi / I$, $X = U \sin \varphi / I$, $P = UI \cos \varphi$, $Q = UI \sin \varphi$, 代入上式化简可得

$$U^4 - 2U^3 I(a \cos \varphi + b \sin \varphi) < U^2 I^2 (r^2 - a^2 - b^2) \quad (4)$$

现对上式讨论:

1) 当 $r^2 > a^2 + b^2$

$$\left(P + \frac{U^2 a}{r^2 - a^2 - b^2}\right)^2 + \left(Q + \frac{U^2 b}{r^2 - a^2 - b^2}\right)^2 > \left(\frac{U^2 r}{r^2 - a^2 - b^2}\right)^2 \quad (5)$$

2) 当 $r^2 = a^2 + b^2$

$$Pa + Qb > \frac{U^2}{2} \quad (6)$$

3) $r^2 < a^2 + b^2$

$$\left(P + \frac{U^2 a}{r^2 - a^2 - b^2}\right)^2 + \left(Q + \frac{U^2 b}{r^2 - a^2 - b^2}\right)^2 < \left(\frac{U^2 r}{r^2 - a^2 - b^2}\right)^2 \quad (7)$$

对于汽轮机的静态稳定圆, 其圆心为 $Z = -j \frac{x_d - x_{con}}{2}$, 半径为 $R = \frac{x_d + x_{con}}{2}$, (x_d 和 x_{con} 分别为发电机的同步电抗标幺值和包括主变在内的系统联系电抗标幺值)。

在 R-X 平面

$$R^2 + \left(X + \frac{x_d - x_{con}}{2}\right)^2 = \left(\frac{x_d + x_{con}}{2}\right)^2 \quad (8)$$

转化至 P-Q 平面

$$P^2 + \left(Q - \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{x_{con}} - \frac{1}{x_d}\right)\right)^2 = \left(\frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{x_{con}} + \frac{1}{x_d}\right)\right)^2 \quad (9)$$

对于隐极发电机的异步圆, 其圆心为 $Z = -j \frac{x'_d/2 + x_d}{2}$, 半径为 $R = \frac{x_d - x'_d/2}{2}$, (x'_d 为发电机暂态电抗标幺值)。

在 R-X 平面

$$R^2 + \left(X + \frac{x_d + x'_d/2}{2}\right)^2 = \left(\frac{x_d - x'_d/2}{2}\right)^2 \quad (10)$$

转化至 P-Q 平面

$$P^2 + (Q + \frac{U^2}{2}(\frac{1}{x'_d} + \frac{1}{x_d}))^2 = (\frac{U^2}{2}(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d}))^2 \quad (11)$$

2.2 工程实例分析

某电厂一台 600 MW 机组参数如下：型号 QFSN-600-2YHG，额定功率 $S_N = 666.66$ MVA，额定有功 $P_N = 600$ MW，功率因数 $\cos\varphi = 0.9$ ，额定转速 $n_N = 3\ 000$ 转/分，发电机定子额定电压 $U_N = 20$ kV，额定电流 $I_N = 19\ 245$ A，纵轴/直轴同步电抗 $x_d = 226.936\%$ ，横轴/交轴同步电抗 $x_q = 220.928\%$ ，

纵轴暂态电抗 $x'_d = 30.253\%$ ， 26.71% （不饱和值与饱和值），横轴暂态电抗 $x'_q = 44.54\%$ ， 39.19% （饱和值与不饱和值），负序电抗 $x_2 = 21.86\%$ ， 20.112% ；零序电抗 $x_0 = 10.071\%$ ， 9.568% ；CT：25000/5；PT：20000/100。表 1 给出了调研收资反馈的数据。可知该机组低励限制方程采用的是折线型，失磁保护原理采用的是静态稳定圆，系统的联系电厂 $x_{con} = 3.13\ \Omega$ ，计算得同步电抗 $x_d = 34.05\ \Omega$ 。

表 1 某电厂机组低励限制和进相试验数据

Table 1 Data of low excitation limit and phase advance test of a power plant

某机组	P_1 /MW	Q_1 /Mvar	P_2 /MW	Q_2 /Mvar	P_3 /MW	Q_3 /Mvar
低励限制	300	-40	400	-30	600	0
进相能力	300	-40	450	-30	600	0

失磁保护考虑到 10% 的裕度，即静态稳定圆的圆心和半径均乘以 0.9，通过软件仿真得出三者在 P-Q 平面上的配合关系如图 3 所示。

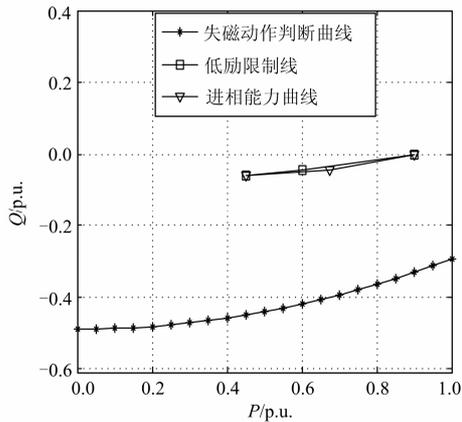


图 3 某机组低励限制、进相能力、失磁保护曲线的配合关系

Fig. 3 Coordination curve of low excitation limit, phase advance capacity and loss protection

通过图 3 可得知，该机组低励限制与失磁保护在考虑 10% 裕度后配合仍较为合理，进相能力也远未达到静稳极限圆的边界；但是低励限制曲线与进相能力曲线离的较近，当发生低励限制时，很可能会越过机组的进相能力曲线，对机组和电网造成重大伤害，故认为该机组的低励限制与进相能力配合不合理。由于该机组进相深度较低，建议重新确定进相数据或者减小低励限制的定值使两者之间留出一定的合理级差。

3 失磁保护与失步保护动作配合的分析及解决办法

发电机运行要具备一定的进相能力，一般失磁保护的动作为异步圆；失步保护的动作为区域通常为透镜形区域。为了提高网源协调水平，实现解列断面的失步解列装置之间的协调配合和失步解列装置与失步保护的协调配合，失步保护 I 段滑极次数一般整定为 1~2；I 段滑极次数若整定为 1，则要求测量阻抗严格依次穿过四个区域，对动作的条件要求太苛刻，容易拒动，故一般整定为 2；II 段滑极次数整定 2~15，作为失步解列的后备；通常失步解列装置滑极次数一般整定为 2。振荡中心落在机组内部，一旦测量阻抗的变化曲线顺序穿过透镜并达到允许次数，则失步保护经过一定延时动作会切除发电机来保护发电机和其他厂用设备；但测量阻抗在顺序穿越失步区时，若滑极次数不满足动作条件且阻抗轨迹已经进入异步圆，则失磁保护就误动作。

图 4 给出了两种保护阻抗区域的一种可能的关系。可以看出发生失步故障时，阻抗曲线 5、曲线 6 在顺序穿过区域 c 之前已经进入区域 a，此时失磁保护可能抢先动作。

通过削去失磁保护异步圆的左半圆或增加阻抗角变化量方向制动判据，可以躲过在完全失磁情况下失磁保护误动作；但是不能保证在完全失磁之外的其他状态下不会进入异步圆。异步圆实质就是一个整定值随电压变化的无功边界圆，只要吸收无功量大于整定值就会进入该圆动作，受系统运行方式的影响很大，缺乏自适应功能。

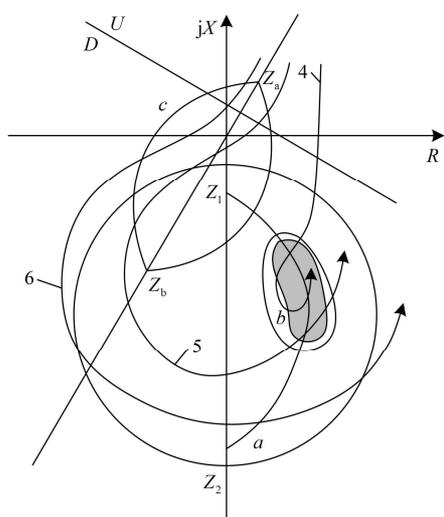


图4 失磁、失步测量阻抗动作区域图

Fig. 4 Measured impedance action area map of loss protection and out-of-step

随着广域监测系统的飞速发展, 利用 PMU 可以容易地测量系统的功率角。由于发电机在功角超过 180° 时, 会出现很大的异步功率, 产生很大的阻尼力矩, 因此发电机很有可能在进入第二摆, 即在功角 $\delta > 2\pi$ 后重新被拉入同步, 稳定在 $2\pi \sim 5/2\pi$ 。

由于这种情况出现的概率不小, 因此可将机组稳定性破坏的功角整定值取为 $\delta = 3\pi$ 。本文提出在失磁保护上加装功角闭锁的方案比起切除阻抗圆和阻抗角闭锁方案, 不但能在动作时间上取得相当的效果, 而且可以通过直接量反应发电机的运行状态, 进行实时测量, 在线整定, 具有自适应的特性, 提高了对发电机保护和控制的灵活性, 防止失磁、失步保护拒动、误动, 对保护电厂具有重要的意义。而传统的解决方案是基于阻抗的, 不能保证在完全失磁之外的情况下测量阻抗进入异步圆而不会误动作。当测量 $\delta > \pi$ 时, 先判断是否失步, 若发生失步, 则闭锁失磁保护, 失步保护动作切除故障; 若没有发生失步, 且 $\delta > 3\pi$ 时, 开放失磁保护, 失磁保护延时动作切除故障。因此可以在失磁保护上加装功角闭锁解决失步时失磁保护抢先失步保护动作的问题。

本文以华中电网实际数据为例, 采用仿真软件进行分析。图 5 给出了华中电网豫华中与豫华北联络断面。在该联络断面假设豫获嘉与豫洹安同杆并架双回线中一回发生三相短路, 另一回发生无故障断开时, 联络断面变成了豫仓颉 50 与豫塔普 50 之间的联络线, 此时豫华中电网的负荷向豫华北输送不出去, 导致豫华中开封地区万全 1G 和金冠 1G 发生失步。通过仿真分析, 图 6 给出了联络断面上

或附近失步发电机功角变化曲线。从图 6 中可以看出, 发电机功角随着时间的延长出现持续增大的趋势, 表明发电机组发生失步。图 7 给出了失步时功角闭锁失磁保护, 而失步保护正确动作的机组功角变化曲线。在图 7 中, 随着系统的变化, 功角曲线趋于稳定, 波动较小, 表示失磁保护已动作, 验证了该方案的可行性。

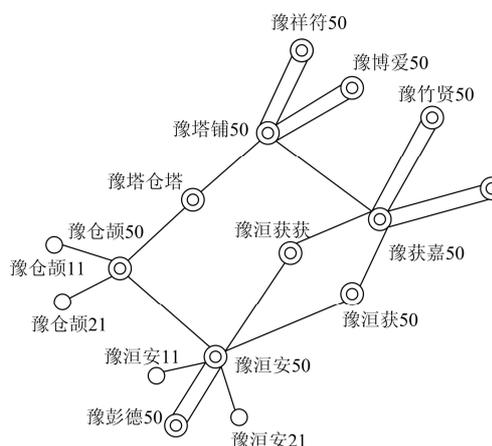


图5 豫华中与豫华北的联络断面

Fig. 5 Liaison section of center and north of Henan

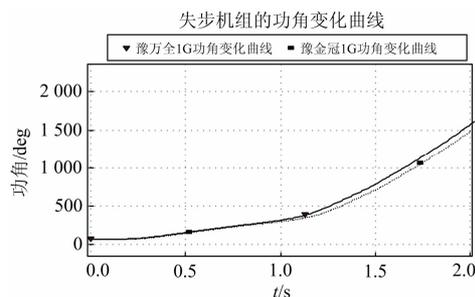


图6 双回线故障时失步机组功角变化曲线

Fig. 6 Power angle curve of generator of out-of-step in double circuit line fault

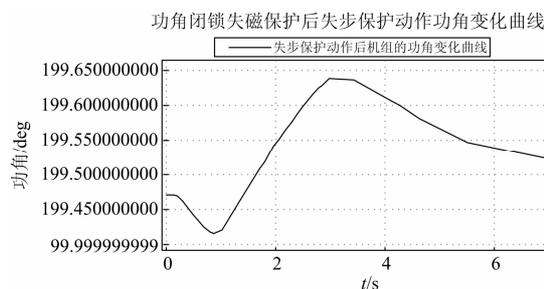


图7 失步保护动作后机组的功角变化曲线

Fig. 7 Power angle curve of out-of-step protection action

4 结语

失磁保护从某种程度上可以看成励磁限制的

后备, 低励限制的整定应根据进相能力确定; 当根据静稳极限整定时有可能会越过进相能力。失磁保护在某种意义上可以看成失步保护的后备。当发生失磁故障时, 三者之间的动作顺序为: 低励限制>失步保护>失磁保护。对于涉网机组失磁保护抢先失步保护动作的情况, 利用功角闭锁方案可以很好地解决这个问题, 该方法提高了对保护和控制的灵活性。对三者之间的配合进行的深入研究对涉网机组和网源协调具有重大的经济意义。

参考文献

[1] 刘一丹, 张小易, 崔晓祥. 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): 235-240.
LIU Yi-dan, ZHANG Xiao-yi, CUI Xiao-xiang. The criterion probe of excitation protection impedance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 235-240.

[2] 裘愉涛, 陈水耀. 一种基于阻抗特性的发电机低励限制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 116-118.
QIU Yu-tao, CHEN Shui-yao. A low exciting limit method of generator based on impedance characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2010, 40(5): 116-118.

[3] 王青, 刘肇旭. 发电机地理限制功能的设置原则[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 55-60.
WANG Qing, LIU Zhao-xu. General principle of generator under excitation limiter settings[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 55-60.

[4] 隋佳音, 徐飞, 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 Jia-yin, XU Fei, XUE An-cheng, et al. A novel accelerated criterion for loss of field protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 69-73.

[5] 陆秋瑜, 徐飞. 考虑电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): 1-5.
LU Qiu-yu, XU Fei. New loss of excitation protection scheme based on coordinated optimization between generator and grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 1-5.

[6] 郭春平, 余振, 殷修涛. 发电机低励限制与失磁保护的配合整定计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 129-132.
GUO Chun-ping, YU Zhen, YIN Xiu-tao. The setting calculation of low excitation limit and loss protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 129-132.

[7] 刘伟良, 荀吉辉, 薛玮. 发电机失磁保护与低励限制的整定配合[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 77-79.
LIU Wei-liang, XUN Ji-hui, XUE Wei. The setting coordination of loss protection and low excitation limit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(18): 77-79.

[8] 徐健, 徐金, 王翔. 发电机失磁保护和失步保护的冲突与协调[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 61-64.
XU Jian, XU Jin, WANG Xiang. The conflict and coordination of loss protection and out-of-step protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(17): 61-64.

[9] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
WANG Wei-jian. Main electrical equipment relay principles and applications[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.

[10] BROWN R D, MCCLYMONT K R. A power swing relay for predicting generation instability[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1965, 84(3): 219-223.

[11] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
LIU Qu. Power system stability and generator excitation control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.

收稿日期: 2014-02-16; 修回日期: 2014-03-13

作者简介:

刘桂林(1987-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定和继电保护与控制; E-mail: 290635133@qq.com

宋 玮(1963-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统继电保护和电力市场等方面的研究;

宋新立(1971-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统仿真软件开发和分析技术研究。