

DOI: 10.7667/PSPC201626

大型汽轮发电机失磁保护定值整定探讨

徐业荣^{1,2}, 包明磊^{1,2}, 李玉平^{1,2}, 桑建斌^{1,2}, 李明^{1,2}

(1. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211100; 2. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 通过分析大型汽轮发电机失磁故障时机端阻抗变化与功率输出变化, 比较两种失磁保护方案: 阻抗原理和逆无功原理失磁保护。经过比较发现两种保护原理主判据实质上相同, 信号出口方式相同。针对逆无功原理失磁保护定值整定没有导则问题, 提出阻抗动作边界映射至 $P-Q$ 平面方法, 确定发电机失磁故障时功率动作边界。克服逆无功原理失磁保护逆无功定值依靠工程经验整定困难, 进一步提高保护定值整定可靠性。以一台 1 000 MW 汽轮发电机参数作为计算实例, 计算两种保护原理的保护定值, 为双重化双原理失磁保护配置提供具体参考。

关键词: 汽轮发电机; 失磁保护; 阻抗原理; 逆无功原理; 定值整定

Discussion on setting calculation of large steam turbine generator loss-of-excitation protection

XU Yerong^{1,2}, BAO Minglei^{1,2}, LI Yuping^{1,2}, SANG Jianbin^{1,2}, LI Ming^{1,2}

(1. Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

2. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: This paper compares the two criterions of generator loss-of-excitation protection based on impedance principle and inverse reactive power principle, by analyzing the variation of the steam turbine generator's power output and generator-end impedance. The main criterions of the two protection principles are demonstrated the same principle and trip mode. The main action area of loss-of-excitation protection based on impedance principle is mapped from impedance plane to $P-Q$ plane, in order to get the power action area. The function can save the setting calculation of the latter one from engineering experience. Finally, taking a 1 000 MW steam turbine generator as an example, the setting calculation of the two kinds of protection principles are calculated, which provides a specific reference for the dual principle loss-of-excitation protection configuration.

Key words: steam turbine generator; loss-of-excitation protection; impedance principle; inverse reactive power principle; setting calculation

0 引言

发电机失磁保护主要有两种原理: 阻抗原理失磁保护和逆无功原理失磁保护。

阻抗原理失磁保护以机端测量阻抗是否落入阻抗动作边界作为失磁保护的主判据^[1-2], 转子低电压为辅助判据^[3]共同组成阻抗原理失磁保护。阻抗动作边界可以是静稳极限圆和异步边界圆中的一种。前者为功角 $\delta=90^\circ$ 时, 机端阻抗在阻抗平面上极限边界; 后者为同步发电机进入异步运行状态后, 机端阻抗在阻抗平面上变化轨迹的包络线^[2]。

逆无功原理失磁保护通过检测联网机组是否从系统侧吸收无功作为主判据, 判断是否发生失磁故障^[4]。发电机发生失磁故障时, 由于需要从系统侧

吸收无功, 定子电流将增大。以发电机过负荷或者过电流作为逆无功原理失磁保护辅助判据, 与主判据共同组成逆无功原理失磁保护。

在失磁保护定值整定中, 阻抗原理失磁保护定值可参考导则^[5], 逆无功原理失磁保护依靠工程经验整定。在工程应用中, 阻抗原理失磁保护一般需要使用转子低电压作为辅助判据。使用无刷励磁系统的发电机由于无法直接采集转子电压^[6], 阻抗原理失磁保护增加误动可能性, 建议使用逆无功原理失磁保护。

发电机失磁保护作为一种涉网保护, 对于电网运行稳定性有着重要影响^[7], 对保护可靠性有着更高要求。为了克服逆无功原理失磁保护依靠工程经验整定保护定值困难, 本文提出一种将阻抗原理失

磁保护动作边界映射至 P - Q 平面, 获得发电机失磁故障时功率变化边界的方法。为逆无功原理失磁保护定值整定提供科学、可靠依据。以一台1 000 MW机组参数为例, 运用此方法, 分别计算两种保护原理的保护定值, 为双重化双原理失磁保护配置提供具体参考。

1 发电机失磁故障理论分析

发电机组与系统联系等值电路简化图如图1所示, E_d 为发电机电动势, U_g 为机端电压, U_s 为系统电压。由于大型汽轮发电机为隐极机, d 轴电抗 x_d 和 q 轴电抗 x_q 相等, 机组向系统侧输出功率方程可简化为式(1)。

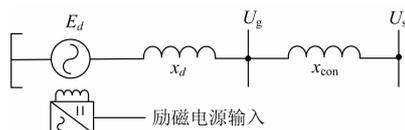


图1 发电机与系统联系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of connection between generator and grid

$$\begin{cases} P_s = \frac{E_d U_s}{x_{d\Sigma}} \sin \delta \\ Q_s = \frac{E_d U_s}{x_{d\Sigma}} \cos \delta - \frac{U_s^2}{x_{d\Sigma}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x_{d\Sigma} = x_d + x_{con}$, x_{con} 为发电机外部系统总电抗。当功角 $\delta=90^\circ$ 时, 可得:

$$\begin{cases} P_s = \frac{E_d U_s}{x_{d\Sigma}} \\ Q_s = -\frac{U_s^2}{x_{d\Sigma}} \end{cases} \quad (2)$$

发电机机端测量阻抗:

$$\begin{aligned} Z &= jx_{con} + Z_s = jx_{con} + \frac{U_s^2}{P_s - jQ_s} = \\ &= \left(\frac{U_s^2}{2P_s} + jx_{con} \right) + \frac{U_s^2}{2P_s} e^{j2\varphi} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, φ 为功率因数角。

发电机发生失磁故障时, 因汽轮机机械部件响应远慢于电磁部件响应^[8], 造成汽轮机能量输出几乎不变, 即发电机有功输出恒定。图2中的圆1、2、3分别表示在有功输出为 P_1 、 P_2 、 P_3 时机端阻抗轨迹。所有等有功圆^[9]在阻抗平面上均与系统联系阻抗 jx_{con} 相切, 等有功圆半径与有功输出大小成反比。

将式(2)代入式(3)中, 可得静稳极限状态时发电

机机端阻抗边界:

$$Z = -j(x_d - x_{con})/2 + je^{j2\varphi}(x_d + x_{con})/2 \quad (4)$$

图2中的圆4即为式(4)在阻抗平面坐标上的轨迹, 圆内阴影部分为发电机失去静稳后机端阻抗分布区。发电机发生失磁故障时, 机端阻抗沿着等有功圆滑入静稳边界圆内, 即机端阻抗由第一象限进入第四象限。

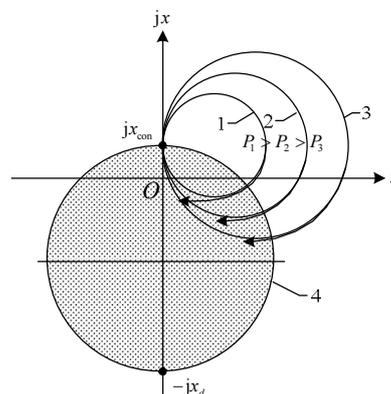


图2 汽轮发电机在阻抗平面上静稳边界示意图

Fig. 2 Schematic diagram of turbo generator's impedance curves of the static and stable limit state

若失磁故障未能及时排除, 发电机最终将失步, 进入异步运行状态, 此时发电机机端测量阻抗与滑差 s 相关。当滑差 $s=0$ 时, 机端阻抗圆介于 x_d 和 x_q 之间; 当滑差 $s=-\infty$ 时, 机端测量阻抗圆介于 x_d'' 和 x_q'' (超瞬变电抗)之间。图3中阴影部分即为发电机异步后机端阻抗变化区域, 用圆4将该区域包围, 即组成异步边界圆。由 $x_d = x_q$, $x_d'' = x_q''$, 可将圆4简化以 $-jx_d$ 、 $-jx_d''$ 之间为直径的圆。

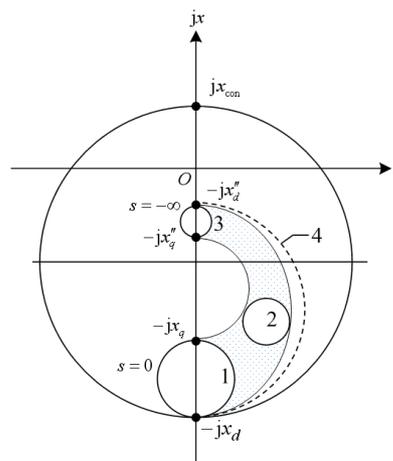


图3 汽轮发电机在阻抗平面上异步阻抗轨迹示意图

Fig. 3 Schematic diagram of turbo generator's impedance curves of the asynchronous limit state

2 发电机失磁保护方案

通过对失磁故障时机端阻抗分析可知，失磁故障后机端阻抗由第一象限滑入第四象限，同时也必然出现发电机需要从系统侧吸收无功。阻抗原理失磁保护方法主判据和逆无功原理失磁保护方法主判据从本质上一致。

2.1 阻抗原理失磁保护方案

阻抗原理失磁保护中阻抗圆整定范围可以采用异步阻抗圆或者静稳极限边界圆，如图 4 中圆 1 和圆 2。

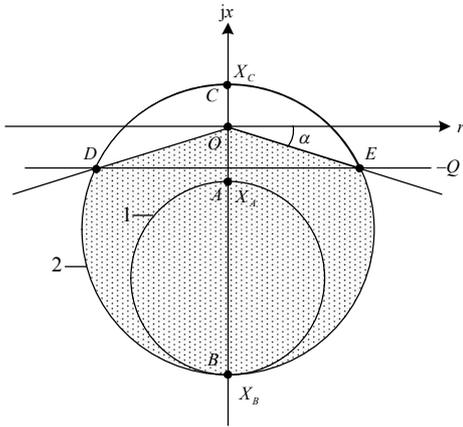


图 4 阻抗原理失磁保护动作区示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the action area of loss-of-excitation protection based on impedance circle

发电机发生失磁后，若未能及时排除故障，发电机最终进入异步运行状态，即异步运行状态为发电机失磁的最终状态。如果以异步阻抗圆为失磁保护阻抗圆边界，容易造成保护的快速性不够。在工程应用中，通常使用静稳边界作为阻抗原理失磁保护阻抗圆边界。对于部分允许进相运行的机组，还需对静稳边界圆进行裁剪：阻抗平面 α 角的正切线裁剪或逆向无功切线裁剪。以 α 角的正切线裁剪方法为例，图 4 中的 $ODBE$ (阴影部分) 为失磁保护的阻抗边界。

由于机端阻抗进入阻抗圆内只是失磁故障时的必要条件，而非充分条件。为了避免阻抗原理失磁保护误动，一般加设转子低电压判据作为辅助判据^[3]。当主判据和辅助判据均满足动作要求时，即可认定机组发生失磁故障。当只有主判据满足要求时，通过适当的延时元件躲过非失磁故障。

图 5 为阻抗原理失磁保护动作逻辑框图。厂用电、励磁系统取自发电机机端的机组，失磁故障且机端电压低于定值时需要切换厂用电和励磁系统。

对于联网机组，发生失磁故障且系统电压过低时需及时将机组从系统中切除，避免造成系统崩溃。

汽轮发电机在失磁状态下一般被允许运行一段时间，在异步运行过程中，若功率大于额定功率，需要发出减出力命令，减少原动机功率输出。

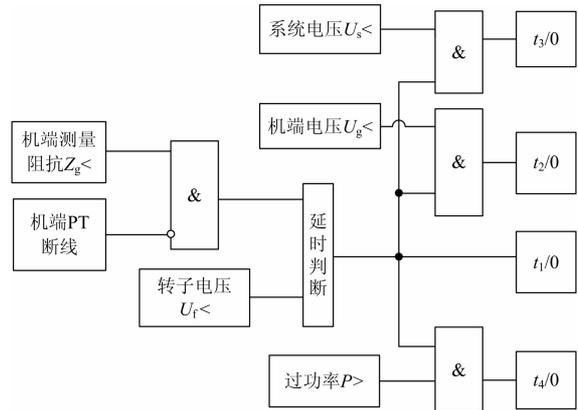


图 5 阻抗原理失磁保护动作逻辑框图

Fig. 5 Logic diagram of generator loss-of-excitation protection based on impedance circle

2.2 逆无功原理失磁保护方案

如图 6 所示，逆无功原理失磁保护判据由两部分组成：联网机组从系统吸收无功功率；机组定子电流过大。当机组从系统吸收无功功率时，保护经过短延时发出告警信号，进入失磁故障准备阶段。定子电流过大判据分为过负荷和过流两段定值判断，增加保护动作出口选择性。当定子电流过负荷且有功输出较大时，保护发出减有功命令。为了避免发电机失步时定子电流发生波动，造成减有功命令返回，保护逻辑中增加自保持环节，使得减有功命令得到持续执行。

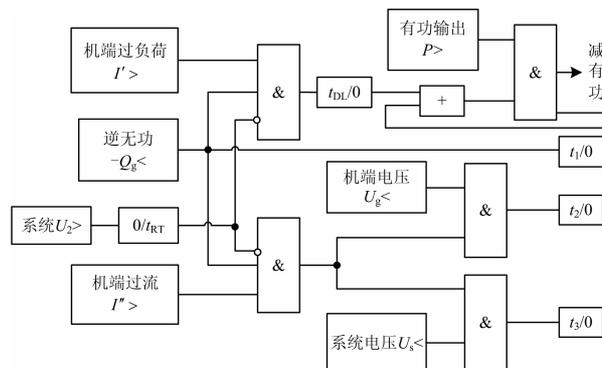


图 6 逆无功原理失磁保护动作逻辑框图

Fig. 6 Logic diagram of generator loss-of-excitation protection based on inverse reactive power

当发电机同时发生逆向无功、定子电流过流故障时，判定发电机发生失磁故障。为了避免系统侧

故障造成保护误动,通过系统侧负序电压闭锁保护,且负序电压消失后继续闭锁 t_{RI} 时间,躲避系统震荡。

当机组失磁故障且机端低电压时,经 t_2 延时切换厂用电。当机组失磁故障造成系统侧低电压时,需经 t_3 延时切机,防止系统崩溃。

3 失磁保护定值整定分析

3.1 失磁保护原理对比

通过对两种失磁保护原理的分析可知,失磁故障时发生机端低电压、系统低电压,阻抗原理失磁保护与逆无功原理失磁保护的出口策略一致。两者的区别体现在判断失磁故障的主判据不同。阻抗原理失磁保护主判据通过判断机端测量阻抗是否落入阻抗边界定值内,逆无功原理失磁保护主判据判断逆向无功大小是否大于定值。

阻抗原理的失磁保护阻抗圆的动作方程为

$$r^2 + (x - X_0)^2 < R_0^2 \quad (5)$$

式中: r 为阻抗平面电阻值; x 为阻抗平面电抗值; X_0 为阻抗圆圆心在电抗轴上值; R_0 为阻抗圆半径。

异步阻抗圆与静稳边界阻抗圆的边界不同体现在动作方程的半径和圆心不同。

针对发电机失磁保护,文献[5, 10]中给出了阻抗原理失磁保护阻抗圆整定导则:

(1) 异步边界阻抗圆

$$\begin{cases} X_a = -\frac{X'_d U_N^2 n_a}{2 S_N n_v} \\ X_b = -X_d \frac{U_N^2 n_a}{S_N n_v} \end{cases} \quad (6)$$

式中: X_a 为异步阻抗圆上端点,标么值; X_b 为异步(静稳极限)阻抗圆下端点,标么值; X'_d 为发电机暂态电抗(不饱和值),标么值; X_d 为发电机同步电抗(不饱和值),标么值; U_N 为发电机额定电压,kV; S_N 为发电机额定视在功率,MVA; n_a 为电流互感器变比; n_v 为电压互感器变比。

(2) 静稳极限边界阻抗圆

$$X_c = X_{con} \frac{U_N^2 n_a}{S_N n_v} \quad (7)$$

式中, X_{con} 为发电机与系统间的联系电抗。

由文献[11]可知:

$$\begin{cases} r = \frac{U^2}{P^2 + Q^2} P \\ x = \frac{U^2}{P^2 + Q^2} Q \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(5)中,可得:

$$U^4 - 2QX_0U^2 < (R_0^2 - X_0^2)(P^2 + Q^2) \quad (9)$$

对于静稳极限边界, $R_0^2 - X_0^2 > 0$,化简式(9)可得:

$$P^2 + \left(Q - \frac{X_0U^2}{X_0^2 - R_0^2}\right)^2 > \left(\frac{R_0U^2}{R_0^2 - X_0^2}\right)^2 \quad (10)$$

将 $X_0 = (X_{con} - X_d)/2$, $R_0 = (X_{con} + X_d)/2$ 代入式(10)中,得到:

$$P^2 + \left(Q - \frac{1}{2}\left(\frac{U^2}{X_{con}} - \frac{U^2}{X_d}\right)\right)^2 > \left(\frac{1}{2}\left(\frac{U^2}{X_{con}} + \frac{U^2}{X_d}\right)\right)^2 \quad (11)$$

对于异步圆边界, $R_0^2 - X_0^2 < 0$,化简式(9)可得:

$$P^2 + \left(Q - \frac{X_0U^2}{X_0^2 - R_0^2}\right)^2 < \left(\frac{R_0U^2}{R_0^2 - X_0^2}\right)^2 \quad (12)$$

将 $X_0 = (X'_d/2 - X_d)/2$, $R_0 = (X'_d/2 + X_d)/2$ 代入式(12)中,得到:

$$P^2 + \left(Q - \frac{1}{2}\left(\frac{2U^2}{X'_d} - \frac{U^2}{X_d}\right)\right)^2 < \left(\frac{1}{2}\left(\frac{2U^2}{X'_d} + \frac{U^2}{X_d}\right)\right)^2 \quad (13)$$

通过图7可以看到,阻抗原理的阻抗动作区域可以映射至 $P-Q$ 平面。圆1、圆2分别表示异步边界阻抗圆和静稳极限动作阻抗圆。圆3、圆4表示在 $P-Q$ 平面上异步边界动作边界和静稳极限动作边界,其中圆3内部为异步边界动作区域,圆4外部为静稳极限动作区域。

逆无功原理失磁保护是经过多年的现场试验总结出的一个保护原理,在以往的定值整定过程中,更多的是依靠工程经验值整定。通过图7和表1,可以将失磁保护时的逆向无功数值量化,便于定值整定的准确性。

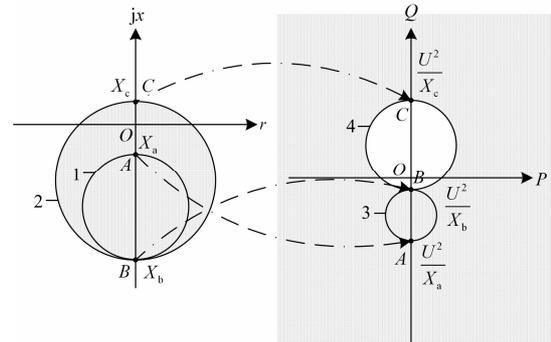


图7 阻抗圆映射至 $P-Q$ 平面示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the mapping the action area from impedance plane to $P-Q$ plane

表 1 动作区域由阻抗平面映射至 $P-Q$ 平面位置对照
Table 1 Reference of action area between impedance plane and $P-Q$ plane

位置	阻抗平面	$P-Q$ 平面	说明
A 点	$X'_d/2$	$2U^2/X'_d$	瞬时电抗的一半及对应无功功率
B 点	X_d	U^2/X_d	同步电抗值及对应无功功率
C 点	X_{con}	U^2/X_{con}	系统联系阻抗及对应无功功率

3.2 失磁保护定值整定实例

逆无功原理失磁保护，在实际工程应用中因为定值整定困难，造成工程应用困难。通过将阻抗原理失磁保护动作区域映射至 $P-Q$ 平面，即可算出机组在静稳极限和异步运行时逆无功定值。

以某 1 000 MVA 汽轮发电机组^[12]为例，额定参数为表 2。工程配置中使用双重化 A、B 屏配置方式，其中 A 屏使用阻抗原理失磁保护，B 屏使用逆无功原理失磁保护。下面分别给出 A、B 屏失磁保护定值计算过程。

表 2 1 000 MW 发电机参数

Table 2 Parameters of a 1 000 MW generator

名称	数值	说明
S_{GN}	1 133 MVA	额定视在功率
P_{GN}	1 020 MVA	额定有功功率
$\cos \varphi_N$	0.9	额定功率因数
U_{GN}	27.5 kV	额定电压
n_{PT}	270	机端 PT 变比
I_{GN}	23 778 A	额定电流
n_{CT}	6 000	机端 CT 变比
X'_{du}	26.4%	非饱和值
X'_d	23.8%	饱和值
X_d	261.4%	饱和值
X_{con}	0.31	系统联系阻抗
V_{fd0}	144 V	空载转子电压

(1) 阻抗原理失磁保护定值整定

发电机额定二次基准阻抗:

$$Z_{g.n} = \frac{U_{GN}^2}{S_{GN}} \times \frac{n_{CT}}{n_{PT}} = 14.83 \Omega$$

静稳极限边界阻抗圆动作边界:

$$X_b = -X_d \times Z_{g.n} = -38.76 \Omega$$

$$X_c = -X_{con} \times Z_{g.n} = 4.6 \Omega$$

阻抗圆圆心: $X_c = -17.08 \Omega$

阻抗圆半径: $X_r = 21.68 \Omega$

转子低电压: $V_{fd1} = 0.6 \times V_{fd0} = 86.4 \text{ V}$

转子特性曲线系数: $K_{fd} = 0.28$

发电机空载转子电压: $V_{fd0} = 144 \text{ V}$

反应功率: $P_t = 4.21$

过功率 $P_g = 0.5 \times P_c = 0.5 \times 617.76 = 308.88 \text{ W}$

(2) 逆无功原理失磁保护定值整定

将静稳极限边界式(11)以发电机额定值为基准，转换为标么值下静稳极限边界方程:

$$P^2 + (Q - 1.42)^2 > 1.80^2 \quad (14)$$

取 10% 的静稳储备系数^[13]，可得静稳极限圆动作边界:

$$P^2 + (Q - 1.278)^2 > 1.62^2 \quad (15)$$

静稳极限圆与 P 轴交于(0.99, 0)点，与直线 $P = 0.9$ (额定功率因素下)相交于(0.9, -0.069)点。

由此确定逆无功定值:

$$Q_g = 0.069 \times 686.39 = 47.36 \text{ W}$$

$$U_g = 85 \text{ V (线电压)}$$

$$\text{系统电压 } U_s = 51.97 \text{ V (相电压)}$$

$$\text{过负荷 } I'_g = 4.36 \text{ A}$$

$$\text{过电流 } I''_g = 4.76 \text{ A}$$

$$\text{过功率 } P_g = 0.5 \times P_c = 308.88 \text{ W}$$

$$\text{负序电压 } U_2 = 0.1 \times U_c = 10 \text{ V}$$

4 结语

本文对比了两种失磁保护原理，通过将阻抗原理平面阻抗圆动作边界映射至 $P-Q$ 平面，使得失磁故障时逆向无功的产生过程更加直观。对于使用无励磁的发电机，由于无法直接采集转子电压，造成保护容易误动。如果使用逆无功原理，则可以避免使用转子电压，并且不用将转子电压引至保护屏柜。由于逆无功原理失磁保护在逆无功定值整定上没有导则可供参考，一般依靠工程经验进行定值整定，造成工程应用困难。通过本文的阻抗映射至功率方法，获取数学模型，具有定值整定可靠特点。本文的定值整定方法为今后无励磁发电机失磁保护配置或者双重化双原理失磁保护配置提供了参考。

参考文献

- [1] 鹿伟, 王增平, 郑涛, 等. 基于振荡边界圆的失磁保护新判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 7-13.
LU Wei, WANG Zengping, ZHENG Tao, et al. Research on a novel loss of excitation protection criterion based on

- impedance circle of oscillatory boundary[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 7-13.
- [2] 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.
- [3] 姚晴林, 祖伟, 汪象侃, 等. 整定值自动随有功功率变化的转子低压型(UL-P型)失磁保护整定计算的研究[J]. 继电器, 1995, 23(1): 3-9.
- [4] 薛伊琴. 发电机失磁保护原理的比较和分析[J]. 继电器, 2005, 33(20): 33-35.
XUE Yiqin. Comparison and analysis of theory of generator loss of field protections[J]. Relay, 2005, 33(20): 33-35.
- [5] DL/T 684-2012 大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S].
DL/T 684-2012 guide of calculating settings of relay protection for large generator and transformer[S].
- [6] 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.
- [7] 刘桂林, 宋玮, 宋新立. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 107-112.
LIU Guilin, SONG Wei, SONG Xinli. Research on coordination of low excitation limit, loss of excitation protection and out-of-step protection based on grid-related protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 107-112.
- [8] 李宗泽, 史成军. 基于二维云模型同步发电机 PID 励磁系统仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 19-24.
LI Zongze, SHI Chengjun. Simulation research on PID excitation system of synchronous generator based on two-dimensional cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 19-24.
- [9] 曹帅, 张清枝. 同步发电机气隙对其稳定性和有功功率影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 91-95.
CAO Shuai, ZHANG Qingzhi. Research of influence of synchronous generator air-gap on stability and active power[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 91-95.
- [10] 王维俭, 桂林, 王雷, 等. 发电机失磁保护定值整定的讨论[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 1-3.
WANG Weijian, GUI Lin, WANG Lei, et al. Discussion on setting calculation of generator loss-of-excitation protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 1-3.
- [11] 严伟, 陈俊, 沈全荣. 大型隐极发电机进相运行的探讨[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 94-97.
YAN Wei, CHEN Jun, SHEN Quanrong. Discussion on large non-salient pole generator phase-advancement operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 94-97.
- [12] 李莉, 刘万斌, 李玉海. 1000 MW 发电机组保护的配置及选型[J]. 华电技术, 2008, 30(8): 8-12.
LI Li, LIU Wanbin, LI Yuhai. Protection configuration and type selection for 1000MW generator set[J]. Huadian Technology, 2008, 30(8): 8-12.
- [13] 郭春平, 余振, 殷修涛. 发电机励磁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 Chunping, YU Zhen, YIN Xiutao. Coordinative setting calculation of minimum-excitation limit and loss-of-excitation protection for generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 129-132.

收稿日期: 2016-03-28; 修回日期: 2016-05-28

作者简介:

徐业荣(1986-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xu.yerong@foxmail.com

包明磊(1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护;

李玉平(1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。

(编辑 魏小丽)