

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210639

基于功率平面隐极发电机低励限制与失磁保护配合研究

王书扬, 王兴国, 李彬, 杜丁香, 郭雅蓉, 姜宏丽

(电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192)

摘要: 同步发电机组的低励限制需先于失磁保护动作, 而低励限制和失磁保护的判据完全不同, 因此二者的整定与配合一直是网源协调的一个难点。从隐极同步发电机静稳边界的功率方程出发, 推导出静稳边界在功率平面上消除了机端电压的抛物线型表达式。将失磁保护与低励限制的判据统一为功率平面的抛物线型静稳边界, 提出了一种低励限制与失磁保护配合的新方案。该方案物理含义明确, 易于整定, 可以保证失磁保护与低励限制之间的严格配合关系。对某 600 MW 火力发电机组开展分析计算, 验证了新方案的有效性, 在提升同步发电机组进相运行能力的同时保障机组和电网安全稳定运行。

关键词: 失磁保护; 低励限制; 配合方法; 功率平面; 整定原则

Coordination of the low excitation limit and loss of excitation protection of a round-pole generator based on a power plane

WANG Shuyang, WANG Xingguo, LI Bin, DU Dingxiang, GUO Yarong, JIANG Hongli

(State Key Laboratory for Security and Energy Saving (China Electric Power Research Institute Co., Ltd.), Beijing 100192, China)

Abstract: The low excitation limit of a synchronous generator set needs to operate before the loss of excitation protection. However, the criteria for the low excitation limit and the loss of excitation protection are completely different. Therefore their setting and coordination have always been a difficulty in network source coordination. Using the power equation of the static stability boundary of a round pole synchronous generator, the parabolic expression of the static stability boundary eliminating the terminal voltage on the power plane is derived. The criteria of loss of excitation protection and low excitation limitation are unified into the parabolic static stability boundary of the power plane, and a new scheme combining these criteria is proposed. The scheme has clear physical meaning and is easy to set. This can ensure the strict cooperation between loss of excitation protection and low excitation limit. The effectiveness of the new scheme is verified by the analysis of and calculation for a 600 MW thermal power generation unit. It ensures the safe and stable operation of the unit and the power grid while improving the leading phase operation capacity of the synchronous generator unit.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5700-202055332A-0-0-00).

Key words: loss of excitation protection; low excitation limit; coordination method; power plane; setting principle

0 引言

目前常用的发电机失磁保护主要由两种原理: 阻抗(导纳)原理和逆无功原理^[1-9]。阻抗原理主要依据静稳边界条件和异步边界条件获得, 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。

低励限制曲线可以根据发电机允许进相程度和系统实际要求的进相计算, 工程中最常用的低励限制线为直线型。

失磁保护是发电机的保护, 低励限制是励磁系统的保护, 因此, 两者在过去的整定计算上不存在任何联系。但从两者的构成原理可知, 低励限制可以起到使机组在进相运行时不超过静稳极限范围的作用, 而失磁保护在发电机失磁或低励后及时跳

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助“基于宽频多源信息交流线路故障识别及保护技术”(5700-202055332A-0-0-00)

闸, 保护发电机本体和系统不受异步运行的危害。两者在机组进相运行时, 必须考虑配合关系, 即励磁调节器的低励限制要先于失磁保护动作, 限制进相运行不致使发电机静稳越界。而最常用的基于阻抗平面静稳边界或基于阻抗平面异步边界的失磁保护难以和功率平面上的低励限制进行配合。文献[10]也指出: 低励限制与失磁保护之间的配合是动态的; 其次是在发电机低励或失磁时低励限制应该首先动作, 若低励限制无效, 则经过一定的过渡裕量, 基于静稳圆的失磁保护才动作, 因此可以将基于静稳圆的失磁保护看作低励限制的后备保护。

但是目前失磁保护普遍使用异步边界阻抗圆判据与静稳极限边界阻抗圆判据, 是基于阻抗平面的判据; 而低励限制普遍使用功率平面的低励限制线, 失磁保护和低励限制的整定与配合从原理上就较为困难。

本文通过理论推导得出了隐极发电机静稳边界在功率平面上消去了机端电压的纯功率表达式, 并以该轨迹为基础, 结合发电机进相运行的限制, 提出了一种基于功率平面静稳边界的失磁保护和低励限制配置及整定方法, 按此方法整定的发电机失磁保护和低励限制天然地具有配合关系。

1 发电机失磁过程分析

如图 1 所示的系统, 忽略电阻分量, 当发电机失磁时, 发电机内电势 E_0 开始降低, 此时原动机调速系统还没有反应, 输出的机械功率恒定, 而电磁功率减小, 此时转子有了不平衡力矩, 开始加速, 功角增大, 保证电磁功率和机械功率平衡; 而随着功角的增大, 发电机开始吸收无功, 进入进相运行状态。在发电机刚开始失磁初期, 在阻抗平面上观察机端阻抗, 可以发现机端阻抗在阻抗平面上是一簇圆, 推导如下。

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U^2}{\hat{S}} = \frac{U^2}{P - jQ} = \frac{U^2}{2P} \left(\frac{2P^2 + 2jPQ}{P^2 + Q^2} \right) = \frac{U^2}{2P} \left(\frac{P^2 + Q^2 + P^2 + 2jPQ - Q^2}{P^2 + Q^2} \right) = \frac{U^2}{2P} (1 + e^{j2\varphi}) \quad (\varphi = \arctan \frac{Q}{P}) \quad (1)$$

式中: Z 为机端测量阻抗; \dot{U} 、 \dot{I} 为机端电压、电流相量; P 、 Q 分别为机端测量有功、无功; φ 为机端功率因数角。由式(1)可以看出, 发电机失磁但仍保持恒功率输出同步运行时, 机端测量阻抗是一个以 $(\frac{U^2}{2P}, 0)$ 为圆心、 $\frac{U^2}{2P}$ 为半径的圆。

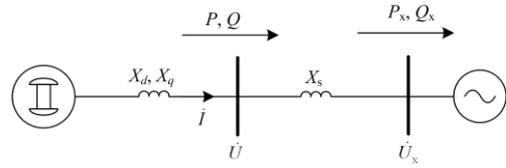


图 1 同步发电机接入无穷大系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of synchronous generator connected to infinite power system

随着失磁程度进一步加深, 功角达到 90° 时, 发电机运行到了静稳极限, 从阻抗平面上来看, 隐极机的静稳边界也是一个圆, 在隐极机静稳边界上, 无穷大母线处接收到的功率为

$$\begin{cases} P_x = \frac{E_0 U_x}{X_{d\Sigma}} \\ Q_x = -\frac{U_x^2}{X_{d\Sigma}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_0 为发电机内电势; $X_{d\Sigma} = X_d + X_s$ 。而 P_x 和 Q_x 之间的关系满足式(3)。

$$-\frac{P_x}{Q_x} = \cot \varphi \quad (3)$$

式中, φ 为功率因数角, 则无穷大系统母线处的测量阻抗满足式(4)。

$$Z = \frac{U_x^2}{P_x - jQ_x} + jX_s = \frac{U_x^2}{-2jQ_x} \left(1 + \frac{P_x + jQ_x}{P_x - jQ_x} \right) = \frac{X_s + X_d}{-2} (1 + e^{j2\varphi}) = -\frac{j}{2} (X_s + X_d) e^{j2\varphi} + \frac{j}{2} (X_s - X_d) \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 隐极机在阻抗平面上的静稳边界为一个圆, 圆心位于 $(0, \frac{1}{2}(X_s - X_d))$, 半径为 $\frac{1}{2}(X_s + X_d)$ 。

当同步发电机进一步失磁, 将进入异步运行阶段, 异步阻抗是转差率 s 的函数。对于凸极发电机, 其转子纵轴和横轴不对称, 随着转子相对于定子旋转, 磁场以转差 s 旋转, 在一定转差下, 异步阻抗的大小还要随转子 d 轴与定子 a 相轴线的夹角 γ 而变化, 这一变化是周期性的, 异步阻抗以两倍转差频率作周期性变化; 对于隐极机, 虽然转子本身比较对称, 但是也有大齿和小齿的差别, 因此隐极机的异步阻抗也是以两倍转差频率变化。异步运行时同步发电机的机端阻抗可表示为^[11]

$$Z = -\frac{1}{2}[jX_q(js) + jX_d(js)] - \frac{1}{2}[jX_q(js) - jX_d(js)]e^{j2(\delta-\varphi)} \quad (5)$$

式中： $jX_q(js)$ 、 $jX_d(js)$ 分别为发电机交轴、直轴运算电抗，发电机异步运行期间，均为转差率 s 的函数； δ 为发电机功角； φ 为机端功率因数角。

由式(5)可知，异步运行时同步发电机的阻抗是和功角 δ 有关的函数，且机端阻抗是周期性变化的。同时机端测量阻抗还是转差率 s 的函数，随着转差率的变化，机端测量阻抗也在变化。

式(5)表明同步发电机在异步运行时，当转差率 s 一定时，发电机机端测量阻抗轨迹在阻抗平面上为一个圆，如图 2 所示。

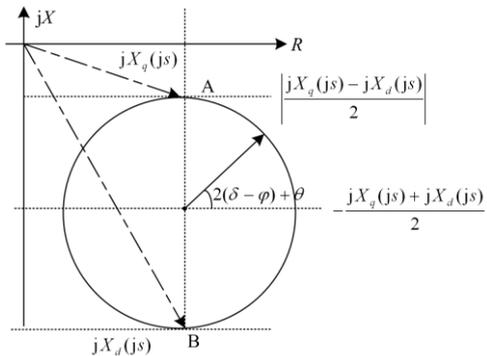


图 2 转差率 s 一定时异步运行同步发电机机端测量阻抗轨迹图

Fig. 2 Generator measured impedance track diagram of asynchronous operation synchronous generator when slip is given

当 s 取 0 时，交直轴运算电抗 $jX_q(js)$ 、 $jX_d(js)$ 就是交直轴稳态电抗。当 s 取向无穷大时，就是发电机交直轴次暂态电抗，交直轴运算阻抗在数值上就已经接近交直轴次暂态电抗 X_d'' 和 X_q'' 。

因此，当转差率取不同值时，机端测量阻抗轨迹是一簇圆，其边界为 $jX_q(js)$ 的轨迹圆 4 和 $jX_d(js)$ 类圆弧 5 轨迹，需要注意的是，异步运行时转差率通常小于零，因此异步运行时机端测量阻抗轨迹一般在第二象限。图中圆 1 为 $s=0$ 时机端阻抗的轨迹，圆 2 为 s 取无穷大时机端阻抗的轨迹，圆 3 为 s 取小于 0 的某个值时机端阻抗的轨迹。由于实际整定计算中很难确定 $jX_d(js)$ 的精确轨迹，

因此通常选用由 $(0, -\frac{jX_d'}{2})$ 和 $(0, -jX_d)$ 确定直径和圆心的圆 6 作为异步阻抗边界^[12]。

由图 3 可以看出，圆 6 可以写出隐极同步发电

机异步边界的表达式为

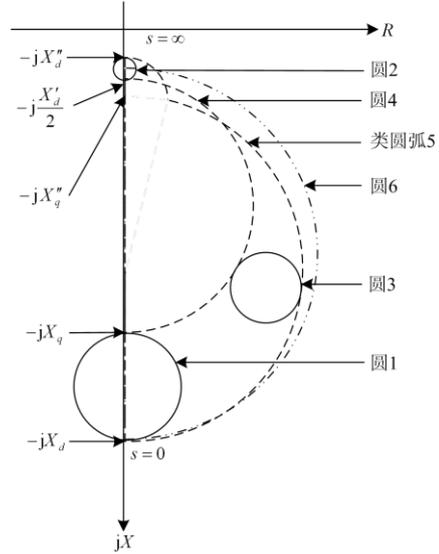


图 3 转差率 s 为常数机端测量阻抗轨迹

Fig. 3 Impedance trajectory measured at the generator terminal when slip is a constant

$$Z = \frac{j}{2}(X_d - \frac{X_d'}{2})e^{j2\varphi'} - \frac{j}{2}(X_d + \frac{X_d'}{2}) \quad (6)$$

需要注意的是，由于式(6)代表一个近似的阻抗平面上的异步轨迹圆，因此 φ' 很难精确计算，也无计算的必要。

由上述的推导，可以画出失磁全过程中机端阻抗轨迹的变化情况，如图 4 所示。

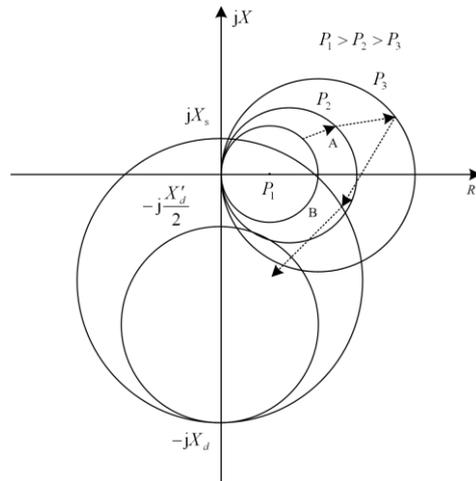


图 4 失磁过程中机端阻抗轨迹变化情况

Fig. 4 Change of impedance track at generator terminal during loss of excitation

一般的失磁保护以异步阻抗圆或者静稳阻抗圆作为判据，通过一般的反演变换，可以将异步阻抗圆和静稳阻抗圆反演到功率平面上，即阻抗和功率

机电压的关系式为

$$\hat{S} = \frac{U^2}{Z} \quad (7)$$

可以看出, 功率的共轭和阻抗 Z 的反演成线性关系, 对式(4)和式(6)进行反演运算, 可以得到功率平面的静稳边界方程为

$$S = j \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_s} - \frac{1}{X_d} \right) + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_s} + \frac{1}{X_d} \right) e^{-j\theta} \quad (8)$$

功率平面的异步边界方程为

$$S = j \frac{U^2}{2} \left(-\frac{1}{X_d} - \frac{2}{X'_d} \right) + \frac{U^2}{2} \left(-\frac{1}{X_d} + \frac{2}{X'_d} \right) e^{-j\theta'} \quad (9)$$

推导出的功率平面上的静稳边界和异步边界如图 5 所示, 图中也标注了直线型低励限制线。

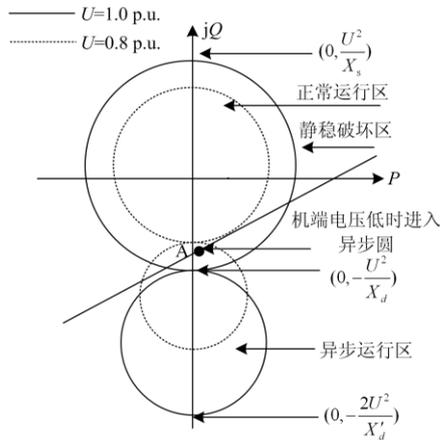


图 5 静稳边界和异步边界功率平面轨迹

Fig. 5 Power plane trajectories of static stable boundary and asynchronous boundary

由图 5 可以得出以下结论:

(1) 隐极同步发电机功率平面上的静稳边界和异步边界均为一个圆, 且相切于一点 $(0, \frac{U^2}{X_d})$ 。

(2) 隐极同步发电机功率平面上的静稳圆内为正常运行区, 圆外为静稳破坏区域, 而异步圆相反, 圆内为异步运行区。因此失磁后, 功率平面上的机端测量功率, 一定是先运动到静稳圆外, 随后进入异步圆内; 因此低励限制只需要考虑与静稳圆配合即可, 且低励限制一定要先于基于静稳圆的失磁保护动作。

(3) 通过阻抗圆反演得到的功率圆, 包含机端电压分量, 进相运行时, 随着机端电压的降低, 静稳边界范围减小, 进相运行的发电机有可能进入异步运行区, 如图 5 的 A 点所示。

两点式直线低励限制主要出现在早期的励磁调

节器中, 由于整定方式比较简单, 必须牺牲发电机一部分进相运行能力来保证满足进相试验的要求。目前国内各厂家常用的是折线式的低励限制线, 即输入若干组(通常为 4~6 组) $P-Q$ 值来拟合进相运行曲线^[13], 保证充分发挥发电机进相能力, 但该方法仍未解决低励限制与失磁保护配合的问题。

2 基于纯功率表达式的抛物线型静稳边界

本节将推导出消除了机端电压变量的静稳边界纯功率表达式, 得到抛物线型的静稳边界。

忽略所有电阻, 隐极机的同步电抗为 jX_d , 系统阻抗为 jX_s , 将图 1 简化为图 6。



图 6 隐极同步发电机接入大电网示意图

Fig. 6 Schematic diagram of round-pole synchronous generator connected to large power grid

对于静稳边界上, 功角 $\delta = 0$, 可以将无穷大系统的有功功率和无功功率表达式改写为^[14-20]

$$\begin{cases} P_\infty = P_E = P = \frac{E_G U_\infty}{X_\Sigma} \\ Q_\infty = -\frac{U_\infty^2}{X_\Sigma} \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_E 、 P_∞ 、 Q_∞ 分别为发电机发出的有功和无穷大系统吸收的有功、无功; E_G 、 U_∞ 分别为发电机内电势和无穷大系统的电压。

发电机机端发出的无功功率 Q 与无穷大系统吸收的无功功率 Q_∞ 存在以下关系。

$$Q - Q_\infty = I^2 X_s \quad (11)$$

发电机内在无功功率 Q_E 与无穷大系统吸收的无功功率 Q_∞ 存在以下关系。

$$Q_E - Q_\infty = I^2 X_\Sigma \quad (12)$$

结合式(12)和式(13)可得

$$\frac{Q - Q_\infty}{Q_E - Q_\infty} = \frac{X_s}{X_\Sigma} \quad (13)$$

发电机、无穷大系统有功、无功功率之间满足如下关系。

$$\begin{aligned} P_E P_\infty + Q_E Q_\infty &= U_E I \cos \phi_E U_\infty I \cos \phi_\infty + \\ U_E I \sin \phi_E U_\infty I \sin \phi_\infty &= U_E U_\infty I^2 (\cos \phi_E \cos \phi_\infty + \\ \sin \phi_E \sin \phi_\infty) &= U_E U_\infty I^2 \cos \delta \end{aligned} \quad (14)$$

式中, $\delta = \phi_E - \phi_\infty$ 。静稳边界上, 功角 $\delta = 0$, 忽略电阻分量, $P_E = P_\infty$, 式(14)可改写为

$$P^2 + Q_E Q_\infty = 0 \quad (15)$$

将式(15)代入式(13), 消去 Q_E 可得

$$P^2 = \frac{Q_\infty}{X_s} (Q_\infty X_d - Q X_\Sigma) \quad (16)$$

在静稳边界上, 由式(10)可以看出, 无穷大系统吸收的无功 Q_∞ 是无穷大系统母线电压与总阻抗 X_Σ 之和的函数, 而对于容量很大的系统, U_∞ 近似为常数, 且隐极同步发电机的同步电抗 X_d 为常数, 因此 Q_∞ 只与系统阻抗 X_s 相关。式(16)表明, 随着 P 的变化, jQ 的轨迹是一条开口向上, 顶点为 $(0, -\frac{U_\infty^2 X_d}{X_\Sigma^2})$ 的抛物线。而当系统阻抗为零时, 抛物线实际上是一条等无功的直线, 如图 7 所示。

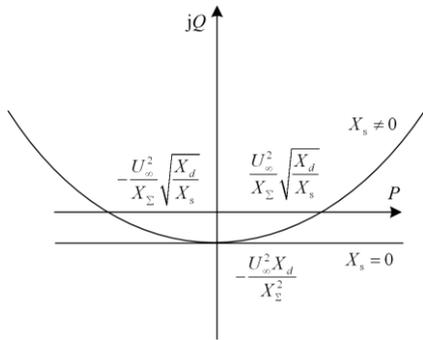


图 7 纯功率静稳边界表达式功率平面示意图
Fig. 7 Power plane diagram of pure power static stability boundary expression

由功率平面静稳边界的表达式(16)和图 7 表明, 当无穷大电网系统电压一定时, 隐极同步发电机的静稳边界是一个仅由系统阻抗 X_s 决定的抛物线, 而第 1 节推导出的式(8)给出了隐极机功率平面上的静稳边界, 是一个由系统阻抗以及机端电压共同决定的静稳圆。

当系统阻抗为 0 时, 图 5 中的静稳边界圆变为一条过 $(0, -\frac{U^2}{X_d})$ 的直线(无穷大圆即为直线), 而图 7 中的抛物线也变为同样一条直线, 两者的轨迹重合; 当系统阻抗从零开始增大时, 抛物线的开口越来越窄, 也即安全运行区域越来越小, 这也和静稳边界的实际物理意义相符合。

一般而言, 发电机的直轴稳态电抗 X_d 是一个固定值, 经典的功率平面静稳圆与系统阻抗 X_s 和机端电压 U 有关, 如式(4)所示。而本节推导出的静稳边界的纯功率表达式(16)消去了机端电压 U , 仅与无穷大系统的电压 U_∞ 和系统阻抗 X_s 有关, 对于大系统而言, 系统电压 U_∞ 基本恒定, 可以认为是一

个常数, 那么抛物线静稳边界就可以通过系统阻抗 X_s 唯一确定。

3 失磁保护与低励限制配合新原理

发电机励磁逐步减弱的过程是: 进相运行→欠励→失磁。对发电机励磁进行调节、控制及保护的顺序是: 低励限制→按静稳整定的失磁保护→静稳边界→按失步整定的失磁保护。

换言之, 它们之间的灵敏度必须严格按顺序配合。而由第 1 节的推导, 以静稳边界整定的失磁保护灵敏度一定是高于以异步边界整定的失磁保护, 因此, 无论失磁保护是按静稳圆, 还是按异步边界整定, 低励限制都与按静稳边界整定的失磁配合整定, 且低励限制的灵敏度必须高于以静稳圆整定的失磁保护。

即使实际运行中失磁保护按异步边界整定, 也要假想一个静稳边界整定的失磁保护作为低励限制的配合基础, 这样可以统一整定原则和方法。

由于 U_∞ 和 X_d 是常数, X_s 是受运行方式变化的唯一变量, 就原理而论, 整定静稳边界就是整定 X_s 。

基于抛物线静稳边界的低励限制与按静稳整定的失磁保护的配合具体方法如下。

(1) 按系统最小运行方式得到的 $X_{s,\min}$ 计算静稳边界。

(2) 令 $X_s = k_1 X_{s,\min}$ 得到按静稳边界整定的失磁保护, 再以 $X_s = k_2 X_{s,\min}$ 得到低励限制。其中, k_1 、 k_2 为配合系数。

通过整定配合系数就能够灵活调整失磁保护和低励限制的配合关系以及灵敏度。低励限制、按静稳整定的失磁保护及静稳边界三者之间在功率平面上的关系如图 8 所示。

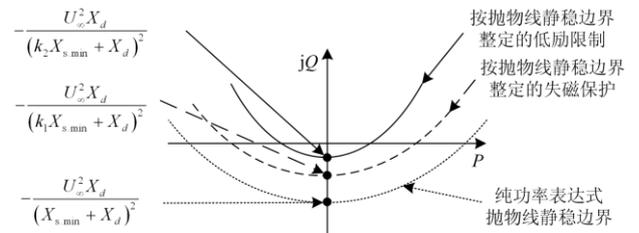


图 8 功率平面上低励限制与失磁保护配合关系
Fig. 8 Coordination relationship between low excitation limit and loss of excitation protection on power plane

一般可取 $k_1 = 1.1$, $k_2 \geq 1.5$ 。系统方式越小, k_2 越小。在确定抛物线型低励限制后, 必须校验其与当前进相运行深度限制的配合关系。

特别需要指出的是, 现行的低励限制动作特性在功率平面上是一条直线, 而本方案设想将低励限制动作特性变为一条抛物线(如图 8 所示)。比较二者可以发现, 低励限制的抛物线动作特性与失磁保护的抛物线特性具有天然的配合关系, 性能优于现行直线型低励限制线和基于阻抗平面静稳圆/异步圆的失磁保护, 且物理含义清晰, 易于整定。

4 算例分析

为了验证本文提出的失磁保护与低励限制功能配合方案的性能, 本文选取了一个典型的 600 MW 火力发电机组, 按照静稳边界阻抗圆整定了静稳边界, 并反演到电压平面得到了功率平面上基于静稳边界的静稳边界; 按照实际进相运行试验得到了直线型低励限制线。

某 600 MW 火力发电机组参数如表 1 所示。

表 1 600 MW 隐极同步发电机参数表

Table 1 Parameter table of 600 MW round pole synchronous generator

发电机参数	符号	数值	单位
额定容量	S_N	660	MVA
额定功率	P_N	600	MW
额定电压	U_N	20	kV
定子绕组电阻	R_s	0.002 12	Ω
直轴同步电抗	X_d	2.2	p.u.

当系统小方式运行时, 系统等值阻抗 $X_{s,\min} = 0.2 \text{ p.u.}$, 当机端电压为 1.0 p.u. 时, 由式(8)可计算出静稳边界功率圆圆心为(0, j2.27), 半径为 j2.727 p.u.。由此可以得到不同机端电压下功率平面上的静稳圆边界。

在发电机功角小于 70° 和定子绕组端部最高温度不超过允许值两个限制条件的约束下, 开展发电机进相试验, 得到发电机进相运行的允许值为

$$\begin{cases} P = 300 \text{ MW}, Q = -120 \text{ Mvar} \\ P = 600 \text{ MW}, Q = -60 \text{ Mvar} \end{cases} \quad (17)$$

由此可以得到功率平面上基于进相试验结果的低励限制线为

$$Q = 0.2P - 0.3 \quad (18)$$

由图 9 可见, 由阻抗平面静稳圆反演到功率平面的静稳圆大小与机端电压密切相关。机端电压越低, 发电机稳定运行的区域越小。当机端电压为 1.0 p.u., 输出有功在 0~1.0 p.u. 时, 低励限制线在静稳边界之上, 当输出有功不变, 发电机进相深度越来越深时, 在功率平面上运行点一定是先越过低励限制线, 自动励磁调节器(AVR)的低励限制功能动

作, 提高转子励磁电流, 防止发电机进一步进相运行; 当 AVR 调节失效, 运行点才会越过功率圆静稳边界进入异步运行区, 此时无论是基于异步圆还是基于静稳圆判据的失磁保护和直线型低励限制都可以正确配合, 满足灵敏度关系^[21-24]。

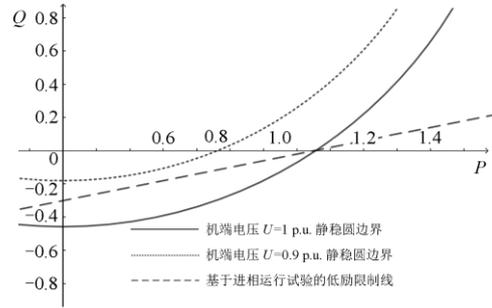


图 9 功率平面上直线型低励限制与典型静稳圆失磁保护配合关系

Fig. 9 Coordination relationship between linear low excitation limit and typical static stable circular loss of excitation protection on power plane

而当机端电压降低至 0.9 p.u. 时, 显然基于静稳圆或者异步圆的失磁保护与低励限制失去配合关系, 失磁保护将先于低励限制动作。

按照第 3 节基于纯功率表达式抛物线型静稳边界, 重新整定失磁保护和低励限制。将系统阻抗 $X_{s,\min} = 0.2 \text{ p.u.}$ 和直轴稳态电抗 $X_d = 2.2 \text{ p.u.}$ 代入式(10)和式(16), 可得功率平面抛物线型静稳边界表达式为

$$Q = 0.2P^2 - 0.382 \quad (19)$$

将系统阻抗 $X_s = 1.1 \text{ p.u.}$ 、 $X_{s,\min} = 0.22 \text{ p.u.}$ 代入式(10)和式(16), 可得功率平面抛物线型失磁边界表达式为

$$Q = 0.197P^2 - 0.37 \quad (20)$$

将系统阻抗 $X_s = 1.5 \text{ p.u.}$ 、 $X_{s,\min} = 0.3 \text{ p.u.}$ 代入式(10)和式(16), 可得功率平面抛物线型低励限制线表达式为

$$Q = 0.3P^2 - 0.35 \quad (21)$$

在 $P-Q$ 平面上作出抛物线型失磁边界和低励限制曲线, 如图 10 所示。

由式(21)、式(18)及 P 、 Q 轴共同围成的阴影部分区域即为本文提出的低励限制允许进相运行的区域; 式(20)确定了失磁保护的动作用曲线。新的综合低励限制线与抛物线型的失磁保护配合方案显然具有以下特点。

(1) 抛物线型低励限制与直线型低励限制的结

合,是为了在保证失磁保护与低励限制配合的基础上,满足发电机进相运行时端部发热安全要求。

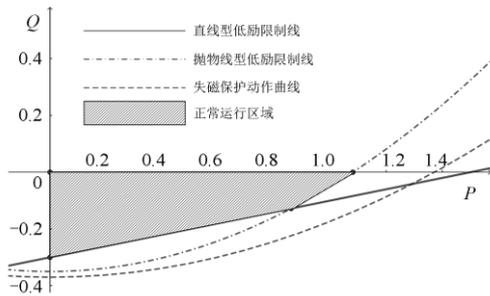


图 10 功率平面上抛物线型低励限制与抛物线静稳边界失磁保护配合关系

Fig. 10 Coordination relationship between parabolic low excitation limit and parabolic static stability boundary loss of excitation protection on power plane

(2) 基于功率平面抛物线型静稳边界的失磁保护仅与系统联系阻抗有关系,消除了机端电压的影响,不仅整定方便,而且只要使用最小运行方式整定动作区,就一定能够保证失磁保护的可靠性。

(3) 基于功率平面抛物线型静稳边界的失磁保护与综合低励限制线天然具备灵敏度配合关系,无论实际失磁保护是以本文提出的抛物线型静稳边界整定或以传统异步圆整定,低励限制动作区完全包含失磁保护动作区,可以很好地解决低励限制与失磁保护整定困难的问题。

5 结论

失磁保护是发电机的涉网保护,对电力系统安全稳定运行有着重要意义,而低励限制则是配置在自动励磁调节器中对发电机本体的保护,主要为了防止发电机端部温升对本体造成损害,两者天然具备配合关系,低励限制可以在励磁电流降低时调节励磁回路增大励磁电流,只有当励磁调节器失去作用,转子电流降低到危害系统静态稳定性时,失磁保护才会动作切除发电机,从这种角度来说,失磁保护可以视为低励限制的后备保护,两者在灵敏度上应严密配合。

在工程上,失磁保护一直以来采用阻抗平面上的静稳边界圆以及异步边界圆作为整定基础,而低励限制一直采用进相试验确定的功率平面上的折线式或者直线式的动作曲线,两者之间的配合从原理上讲较为困难。而通过常规的反演变换,将基于静稳圆(或异步圆)的失磁保护动作区,从阻抗平面转换到功率平面后,动作区不仅与系统联系阻抗有关,

还与机端电压相关,整定配合上存在困难。

本文通过理论分析推导出了功率平面上与机端电压无关的抛物线型静稳边界,并以此为基础提出了一种新的低励限制与失磁保护配合方案,新方案不仅物理含义明确,整定方便,还可以保证失磁保护与低励限制的配合关系。对于凸极机而言,其静稳边界不易直接推导,是否存在与机端电压无关的功率平面静稳边界表达式仍待进一步探究。

参考文献

- [1] 解兵,徐珂,刘建坤,等.励磁调节器低励限制整定原则和整定方法研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(8):142-147.
XIE Bing, XU Ke, LIU Jiankun, et al. Study on the principle and setting method of low excitation limit setting for excitation regulator[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 142-147.
- [2] 郑涛,余青蔚,詹荣荣,等.调相机接入对发电机失磁保护的影响[J].电力系统保护与控制,2018,46(4):50-56.
ZHENG Tao, YU Qingwei, ZHAN Rongrong, et al. Impact of synchronous condenser access on generator loss of excitation protection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 50-56.
- [3] 肖明,孙承海,罗敏,等.发电机失磁保护与低励限制配合策略研究[J].山东电力技术,2018,45(2):49-51,65.
XIAO Ming, SUN Chenghai, LUO Min, et al. Research on coordination of field loss protection and low excitation limitation for generators[J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(2): 49-51, 65.
- [4] 王权.发电机失磁保护与欠励限制整定配合的探讨[C]//继电保护及安全自动装置、励磁和直流系统反事故措施研讨会,2017年8月23日,中国,贵阳:46-51.
WANG Quan. Discussion on the coordination of generator loss of excitation protection and under excitation limit setting[C] // Seminar on Anti Accident Measures of Relay Protection and Safety Automatic Device, Excitation and DC System, August 23, 2017, Guiyang, China: 46-51.
- [5] 沈全荣,陈佳胜,陈俊,等.基于导纳特性的水轮发电机失磁保护新判据[J].电力自动化设备,2017,37(7):220-223.
SHEN Quanrong, CHEN Jiasheng, CHEN Jun, et al. LOE protection criterion based on admittance characteristic for hydraulic generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 220-223.
- [6] 兀鹏越,徐雷钧,王正元,等.基于导纳测量原理的隐极发电机失磁保护应用[J].电力自动化设备,2017,37(5):205-210.
WU Pengyue, XU Leijun, WANG Zhengyuan, et al. Application of under-excitation protection based on admittance measurements in non-salient pole synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 205-210.

- [7] 陈明. 发变组继电保护分析及失磁保护研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
CHEN Ming. Analysis of relay protection for generator transformer unit and research on loss of excitation protection[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017.
- [8] 徐业荣, 包明磊, 李玉平, 等. 大型汽轮发电机失磁保护定值整定探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 154-159.
XU Yerong, BAO Minglei, LI Yuping, et al. Discussion on setting calculation of large steam turbine generator loss-of-excitation protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 154-159.
- [9] 陈寿根, 郝巍, 王凯. 大型发电机失磁故障分析[J]. 中国电力, 2016, 49(5): 20-23, 34.
CHEN Shougen, HAO Wei, WANG Kai. Analysis of the excitation-loss fault of a large generator[J]. Electric Power, 2016, 49(5): 20-23, 34.
- [10] 宋玮, 刘桂林, 吴国旻, 等. 发电机组涉网保护与限制配合的自动校核[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 163-167.
SONG Wei, LIU Guilin, WU Guoyang, et al. Automatic check of coordination between grid-related unit protection and limiter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 163-167.
- [11] 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, 2010.
- [12] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [13] 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, 9.
GAO Chunping, YU Zhen, YIN Xiutao. Coordination setting calculation of generator low excitation limit and loss of excitation protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 129-132, 9.
- [14] 贾德峰, 王明东, 傅润炜, 等. 抽水蓄能机组 RTDS 仿真与失磁保护改进研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 158-164.
JIA Defeng, WANG Mingdong, FU Runwei, et al. RTDS simulation and improvement of excitation-loss protection for pumped storage units[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 158-164.
- [15] ENASS M, GARY K, ELTOM A. Investigation of a new method for synchronous generator loss of excitation protection[C] // 2019 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), August 4-8, 2019, Atlanta, GA, USA.
- [16] 薛磊, 陈远志, 寇水潮, 等. 660 MW 汽轮发电机失磁后稳态异步运行过程分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 181-187.
XUE Lei, CHEN Yuanzhi, KOU Shuichao, et al. Analysis of stable asynchronous running of 660 MW turbine generator for loss of excitation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 181-187.
- [17] EL-SAADAWI M, HATATA A. A novel protection scheme for synchronous generator stator windings based on SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(3): 257-268.
- [18] BARACHO F, COELHO A, FILHO C P, et al. New admittance approach applicable to the coordination between the loss-of-excitation protection and the underexcitation limiter[J]. IEEE Latin America Transactions, 2020, 18(10): 1732-1742.
- [19] 王少雄, 潘学萍, 颜君凯, 等. 大容量调相机参与下特高压交直流电力系统稳态电压协同控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 120-127.
WANG Shaoxiong, PAN Xueping, YAN Junkai, et al. Coordinated control of steady-state voltage for UHVDC/AC power systems with large-scale synchronous condenser integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 120-127.
- [20] 杨瑞玉, 王克文, 王君亮, 等. 大容量调相机对省级电网的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 128-135.
YANG Yaoyu, WANG Kewen, WANG Junliang, et al. Analysis of the influence of a large-capacity condenser on a provincial power grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 128-135.
- [21] HASANI A, HAGHJOO F, DA SILVA F F, et al. Synchronous generator loss of field protection: a real-time realistic framework and assessment of some recently proposed methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 971-979.
- [22] 张志杰, 姚伟, 高磊, 等. 考虑发电机性能差异性的励磁顶值电压优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 41-49.
ZHANG Zhijie, YAO Wei, GAO Lei, et al. Optimal configuration of excitation system ceiling voltage considering different performance of generators[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 41-49.
- [23] 石建飞, 戈宝军, 吕艳玲. 异步化高压发电机失磁故障分析[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(3): 46-55, 66.
SHI Jianfei, GE Baojun, LÜ Yanling. Analysis of excitation loss fault of cable winding asynchronous high-voltage generator[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(3): 46-55, 66.
- [24] ROSTAMI A, REZAEI N. A novel loss-of-excitation protection strategy based on reactive power increment of synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(6): 3733-3742.

收稿日期: 2021-03-31; 修回日期: 2021-08-18

作者简介:

王书扬(1993—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: wangshuyang@epri.sgcc.com.cn

(编辑 许威)