

发电机失磁保护动作原因分析与处理

杨新凯

(河南能源化工集团安化公司)

摘要：如果发电机的励磁系统调控故障或失效，可能会引发励磁电压的异常降低甚至消失，从而引发发电机与系统之间同步性的失衡，这对机组及电力系统安全可能产生严重影响。常规上，失磁保护主要构成于静稳阻抗、异步阻抗的主判断准则，同时辅以励磁低电压和机端低电压的次要判断准则。本文将通过深度探究发电机失磁的成因、判断方法，以及实例讲解发电机失磁状况下的应对手段。

关键词：发电机；失磁保护；电力系统；静稳阻抗；异步阻抗

2024.05.DQGY
51

0 引言

安化集团 4# 发电机型号为：QFW-12-2，额定功率：12MW，额定电流：1375A，定子绕组单 Y 接线，中性点不接地。出线经母线桥至 AH05# 开关柜接热电站 6kV 母线 I 段，并接 302 站 6kV I 段入网。因同 I 段的一台 2600kW 空压机启动时发电机报失磁二段跳闸，本文对发电机失磁保护动作原因及处理措施进行分析阐述。

1 发电机失磁经过与初步分析

2023 年 7 月 15 日安化集团供电系统正常运行，4# 发电机所带负荷 2900kW，10 时 41 分 47 秒 4000 空分高压室 I 段一台容量为 2600kW 的空压机正常启动，10 时 41 分 48 秒热电站 4# 发电机报失磁二段保护跳闸，导致 4# 发电机与电网解列，查看当时运行方式为热电站 4# 发电机与空压机同在 I 段运行，根据现场实际情况初步判断造成发电机失磁的原因有以

下五种：

- 1) 励磁柜至现场励磁机电压线电缆有断裂情况。
- 2) 励磁柜控制器已运行长达 10 年，有故障的可能。
- 3) 空压机启动时造成系统电压波动，励磁柜强励误动作。
- 4) 失磁保护定值整定计算有误。
- 5) 微机继电保护装置故障导致误动作。

综合以上几项原因，针对性排查情况如下：①停机后对现场励磁机电缆进行检查，励磁电缆绝缘良好，无断股及接地现象；②空压机启动时系统电压仅有稍微降低，未达到励磁柜强励动作条件；③失磁保护定值由设计院专业人士核算，与发电机实际运行相符；④对励磁系统、微机继电保护装置校验，调试均正常。因此，4# 发电机失磁的核心问题并不在此，再次审视发现发电机发生失磁动作的情况是一台 2600kW 的空压机启动后，4# 发电机失磁保护动作并

与电力系统解列，初步的推断是继电保护装置的失磁判断出现问题，并将对这个原因进行深入分析。

2 发电机微机继电保护失磁判据组成

当发电机的励磁系统发生故障，可能会引起励磁力的下降甚至消除，从而使得发电机与系统脱离同步，这将会对机组及电力系统的安全带来极大风险。因此，对于大规模和中等规模的机组，必须装设失磁防护设备。失磁保护的关键判断标准可以由以下的一项或两项准则组成。

2.1 静稳极限励磁电压 $U_{fd}(P)$ 主判据

优势在于：该标准能在失磁的初始阶段，一旦发生偏差，因 U_{fd} 迅速下滑， $U_{fd}(P)$ 标准即可立即进入动作状态；在常规操作条件下失磁， $U_{fd}(P)$ 标准的动作速度比静稳边界阻抗标准快约 1s 以上，具有预见性失磁失步的功能，能有效提升机组的压力输出或者切换励磁的效率。系统网络见图 1。

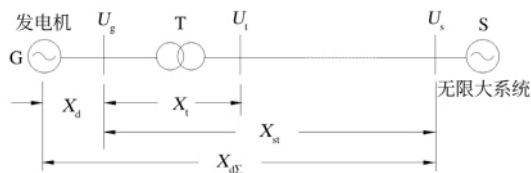


图 1 计算示意图

$U_{fd}(P)$ 判据的动作方程为：

$$U_{fd} \leq K_{set} (P - P_t) \quad (1)$$

式中， $K_{set} = \frac{P_n}{P_n - P_t} \cdot \frac{C_n X_d U_{fd0}}{U_s E_{d0}}$ ； K_{set} 为整定系数，V/W， K_{set} 即为 $U_{fd}-P$ 平面上动作特性直线的斜率； P 为发电机的有功功率，W； P_n 为发电机的额定功率，W； P_t 为发电机凸极功率， $P_t = \frac{U_s^2 (X_d - X_q)}{2(X_d + X_{st})(X_q + X_{st})}$ ，W； U_s 为无限大系统母线电压归算到发电机机端电压的数值，V； E_{d0} 为发电机的空载电势，V； U_{fd} 为发电机的励磁电压，V； U_{fd0} 为发电机的空载励磁电压，V； $X_{d\Sigma} = X_d + X_{st}$ (X_{st} 代表了从机端到无限大系统之间的联系

电抗)，然后把这个数值转换成在机端电压的数值， Ω 。

C_n 为额定有功时的修正系数， $C_n = \frac{\cos 2\delta_{jn}}{\sin^3 \delta_{jn}}$ ， δ_{jn} 为发电机额定有功时极限功率角，当电机处于额定功率时， C_n 代表修正因子，并且它是最大功率角。在实际应用中，没有必要计算它，只要根据 $K_n = P_n/P_t$ 的比例信息参考相应的表格或曲线，就能找到 C_n 的数值，参阅如表 1 所示的有关 C_n 的表格和曲线。

表 1 $K_n - C_n$

K_n	C_n	K_n	C_n	K_n	C_n
3.3	0.847	5.6	0.941	7.7	0.968
3.6	0.869	6.0	0.948	8.0	0.970
4.0	0.891	6.3	0.953	8.3	0.972
4.3	0.904	6.6	0.957	8.7	0.975
4.7	0.919	6.8	0.959	9.0	0.976
5.0	0.927	7.1	0.962	9.5	0.979
5.3	0.935	7.4	0.965	10.0	0.981

图 2 展示了 $U_{fd}(P)$ 判据的行为特征呈倾斜的直线型态。

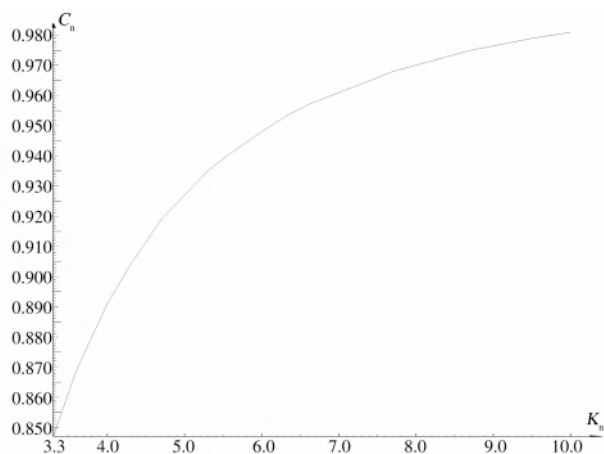


图 2 $K_n - C_n$ 曲线

$U_{fd}(P)$ 判定可能在磁场丧失和失步之后出现不稳定，建议执行自我保持或延迟回归策略以确保其持续作用。在系统短路过渡阶段以及系统振动过程中， $U_{fd}(P)$ 判定可能产生操作错误，应执行有效的闭锁

机制以确保出口的准确性。

2.2 定励磁低电压判据

为了保证在发电机空载运行及 $P < P_t$ 的轻载运行状况下失磁时保护的安全性，或为了全失磁及严重部分失磁时保护能较快响应，附加装设整定值为固定值的励磁低电压判据，简称之“定励磁低电压判据”，其动作方程如下：

$$U_{fd} \leq U_{fd.set} \quad (2)$$

式中， $U_{fd.set}$ 为励磁低电压设定值，设定的范围是 $(0.2 \sim 0.8) U_{fd0}$ ，通常可以选择 $U_{fd.set}$ 等于 $0.8 U_{fd0}$ 。

如果“定励磁低电压判据”是单独输出的，还需要实施“ $I < 0.06 I_n$ ”的闭锁操作，其目的是避免在发电机并网和解列过程中发生失磁保护的错误输出。

在系统出现短路或其他严重干扰，以及由此引发的系统振动过程中，“稳定励磁低电压逻辑”不会错误触发。

图 3 所示的水平直线部分，呈现出了固定磁化低电压判断标准的反应特性曲线。

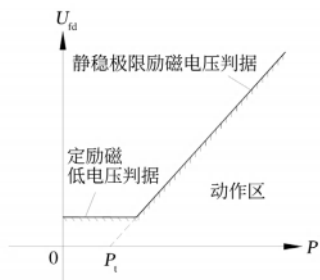


图 3 $U_{fd}-P$ 以及恒定励磁低电压决策动作特征曲线

2.3 静稳边界阻抗判据

采用 0° 接线（ $\dot{U}_{ab} \dot{I}_{ab}$ ）方式，使得阻抗扇形与发电机静态稳定限界圆进行匹配，其动作特性如图 4 所示。当发电机失去励磁电流和励磁电压后，机端测量的阻抗路径从图中的第一象限随时间推移进入第四象限，一旦达到静态稳定限界的邻近区域，便会进入这个限界圆之中。满足静稳边界阻抗评定规范后，会

有一个 1~1.5s 的延时过程进行发出失磁信息或实行跳闸，这个 1~1.5s 的延时是以防系统出现振荡。由扇形和 R 轴所组成的 $10^\circ \sim 15^\circ$ 角，旨在避免因发电机出口的转换阻力所造成的相间短路，同时也是为了预防发电机在正常进相行为中的干扰。

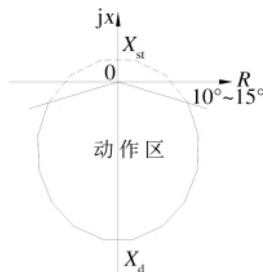


图 4 静稳边界阻抗判据动作特性

需要明确，发电机产品手册中的 X_d 值，以“ X_d （铭牌）”形式出现，是铭牌上的表示值，属于不饱和值。这个数值是发电机制造商在机端三相短路而短路电流低于额定电流的条件下试验得出，可能存在较大误差。

为了避免失磁保护错误触发，在静态稳定扇区以及 $U_{fd}(P)$ 失磁保护判断标准的设定计算过程中，使用的 X_d 值定义如下： $X_d = X_d(\text{铭牌}) / 1.3$ 。

2.4 稳态异步边界阻抗判据

当发电机出现会引发失步的失磁现象后，首先触及静态平衡的边缘，接着切换至非同步运行，最终达到稳定的非同步运行模式。该判断条件的操作模式为下抛圆模式，与发电机稳定的非同步边界模式相吻合。特征曲线可参见图 5。

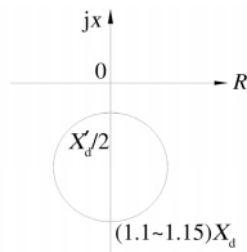


图 5 阻抗特性曲线

2.5 主变高压侧三相同时低电压判据

发电机在失磁之后可能会导致主变压器高压侧（系统）电压下降，进而可能导致部分电网电压瓦解。因此，在设计失磁保护方案时，应将“三相低电压”的判断标准加入其中。为了避免误触发该标准，它应该和其他标准共同构成“与”门输出。

该评定标准主要用于评估失磁状态下的发电机对系统电压（即母线电压）的作用。

$$U_t \leq U_{t.set} \quad (3)$$

式中， $U_{t.set}$ 为主变高压侧的电压，它的正常值范围约在 U_n 的 85%~90%。不过，在一些特殊情况下，当发电机失去励磁的时候，主变高压侧的电压无法降至设定值以下。这种时候，决定规则可以改为“发电机机端三相同步低电压”，此时的 $U_{t.set}$ 的取值通常会选在 U_n 的 75%~80%（具体应根据厂用系统）。

2.6 机端过电压判据

在诸如发电机突然丢失负荷等过电压场景下，会强制降低励磁，导致 U_{fd} 的骤降，这可能会误触发 U_{fd} （P）判定或是低电压励磁判定。因此，会运用机端过电压判定来防止这种情况，且执行后会进行 4~6s 的延时锁闭措施，避免误动作的失磁保护出口。

$$U_g \geq (1.1 \sim 1.25) U_{gn} \quad (4)$$

式中， U_{gn} 为发电机机端额定电压。

发电机微型保护系统是根据发电机端部测量的阻抗异步阻抗圆来进行动作判断的。

3 失磁保护定值计算

3.1 发电机数据

$S=12/0.8=15\text{MVA}$ ， $U_{n1}=6.3\text{kV}$ ，1375A 纵轴超瞬变电抗 $X_d''=11.6\%$ ，纵轴瞬变电抗 $X_d'=19.2\%$ ，纵轴同步电抗 $X_d=193.1\%$ ，逆序电抗 $X_2=14.2\%$ ，零序电抗 $X_0=5.85\%$ ，短路比 0.51。

3.2 阻抗计算

(1) 发电机阻抗 (5)

$$Z_n=6.3^2/15=2.646\Omega$$

计算失磁保护用同步电抗：(6)

$$X_d=0.8 \times 1.931=1.545$$

(2) 系统联系电抗

热电站 6kV 母线故障，系统提供最大三相短路电流：16.695kA

$$X_{com}=\frac{S_n}{\sqrt{3}U_n I_{kmax}}=\frac{15}{\sqrt{3} \times 6.3 \times 16.695}=0.0823 \quad (7)$$

(3) 异步边界阻抗

$$X_a=-0.5X_d'Z_n\frac{n_a}{n_v}=-0.5 \times 0.192 \times 2.646 \times \frac{400}{60}=-1.69 \quad (8)$$

$$X_b=-X_dZ_n\frac{n_a}{n_v}=-1.545 \times 2.646 \times \frac{400}{60}=-27.25$$

(4) 静稳极限阻抗

$$X_c=X_{com}Z_n\frac{n_a}{n_v}=0.0823 \times 2.646 \times \frac{400}{60}=1.45 \quad (9)$$

式中， X_{com} 为系统与发电机之间的电抗，包括变压器（如果有）、系统及线路标么值。以发电机额定值为基准， n_a 、 n_v 为电流互感器、电压互感器变比。

3.3 发电机侧主判据

(1) 静稳边界阻抗

$$Z_{1A}=X_c=1.45\Omega \quad (10)$$

$$Z_{1B}=|X_b|=27.25\Omega$$

(2) 稳态异步阻抗

$$Z_{2A}=|X_a|=1.69\Omega \quad (11)$$

$$Z_{2B}=|X_b|=27.25\Omega$$

3.4 辅助判据

(1) 励磁低电压

$$U_{fd.set}=0.8U_{fd0}=0.8 \times 47=37.6\text{V} \quad (12)$$

（ U_{fd0} 为发电机空载励磁电压）

(2) 机端低电压

$$U_{op}=0.9U_{gn}/n_v=5670/60=94.5V \tag{13}$$

4 失磁动作原因发现与分析

装置失磁动作记录如表 2 所示。

表 2 4# 机失磁动作记录表

I_{ab}	I_{bc}	I_{ca}	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	U_L
5.09∠210	5.03∠89	5.01∠330	101∠107	102∠347	102∠227	146.66

表中动作值的计算结果表明，其阻抗值在异步圆动作范围内满足了动作需求，同时发电机的设定值和保护设备的响应都表现正常。经过对表 2 的动作值重新分析，发现 U_{ab} 和 I_{ab} 之间的角度差距约为 -120° ，可是励磁电压正常，初步怀疑是失磁误动作。再去检查正常运行状态下的电流电压相位角，发现 I_a 是 180° 角，而 U_a 仅为 36° 角，推断可能是保护电流 I_a 、 I_b 、 I_c 的接入和接出方向反了。作为发电机的关键保护设备，失磁保护的逻辑对保护电压、电流接线方式要求 0° 接线。为了进一步找出问题的原因，使用多功能相位仪来测量正在正常运行的电流、电压相位，测试结果如图 6 所示。

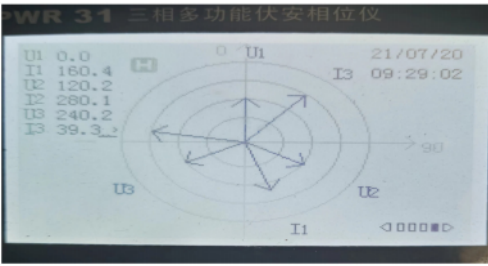


图 6 原电流电压相位图

依据图中所示电压与电流相位关系，能明显分辨出保护电流 I_a 、 I_b 、 I_c 进出接反，导致实际运行中其阻抗值为稳态异步阻抗，计算后落在第三象限，当大容量空压机启动时，系统无功缺额比较大，发电机输出无功增加，以致发电机电流上升，阻抗值下降为定值整定以下后失磁二段动作。

5 对策实施与效果分析

- 1) 调整 4# 发电机失磁保护使用的电流互感器的极性，并对发电机的端部电流互感器的起始和终止端进行设置，以此修正发电机端部电流互感器的电流方向。
- 2) 继续优化图纸，对失磁保护电流互感器接线方式的错误进行修正。
- 3) 利用微机继电保护测试系统对投用的失磁保护功能进行再次试验，确保动作逻辑可靠、准确。
- 4) 试验结束后，4# 发电机并网运行，再次利用多功能相位仪对调整后运行中的电流、电压相位进行测试，结果如图 7 所示。

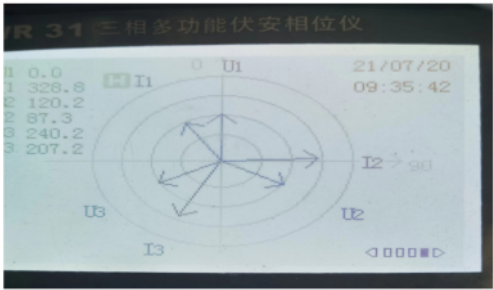


图 7 调整后电流电压相位图

通过图片中的数据分析，能明显观察到发电机 U_{ab}/I_{ab} 在经过调节后在第一象限进行运行。有功功率和无功功率都处在正值状态，这是计算发电机阻抗的标准位置。为进一步验证调整后失磁保护的可靠性，实际模拟当时场景进行空压机启动试验，在两次启动试验中发电机均正常运行。

6 结束语

通过此次 4# 发电机失磁保护跳闸动作原因的分析，对发电机失磁保护逻辑与判定方式有了深刻了解，但想成为一名合格的继电保护专员，还应加强继电保护专业知识的学习，对运维的发电机二次回路应定期检查，对于新投入的保护功能应提前校验定值的可靠性与对应二次接线的准确性。

(下转第 60 页)

(上接第 55 页)

参考文献

- [1] DL/T684—2012 大型发电机变压器继电保护整定计算导则 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [2] 杨奇逊, 黄少锋. 微型机继电保护基础 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] 曾南. 发电机失磁保护误动作分析处理 [J]. 中国井矿盐, 2019, 50 (3): 28-30.
- [4] 刘介才. 工厂供电 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

(收稿日期: 2023-10-10)