

# ABB发电机组 失磁保护配置与异步运行探讨

◆ 李海争

## 1 引言

我国近年发电机组的运行情况资料表明,100MW及以上发电机共发生电气故障252次(不包括逆功率故障),其中失磁故障为47次,约占总故障的18.7%。这是发电厂各种电气故障中发生最多的一种<sup>[1]</sup>。因此,研究失磁保护及失磁后运行人员的应对措施(包括发电机异步运行),是一件非常有意义的工作。

## 2 失磁产生原因及危害

### 2.1 常见的励磁系统故障分类

根据不同的励磁方式分类,励磁系统发生的故障主要有:

(1) 自动励磁调节器故障(AVR)。励磁调节元件质量差,主回路故障时不能自动切换到备用励磁回路;调压电位计接触不良,工作性能较差等。

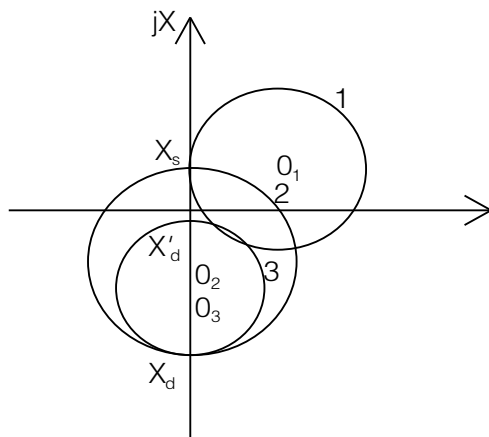
(2) 励磁变压器故障。变压器发生绕组间短路、接地等故障,直接跳开励磁开关,通过发变组保护柜进行保护出口,发励磁故障等信号。

(3) 交流励磁机及副励磁机事故。交流励磁机连轴器螺杆折断;副励磁机事故等。

(4) 励磁回路事故。发电机集电环系统故障,直流电缆接地短路;磁场回路断开;灭磁开关故障(开关机构故障)等。

(5) 误操作事故。维护集电环炭刷及消缺时失误;切换主、备用励磁机时失误;手动与自动励磁切换时失误;误跳灭磁开关等。

(6) 整流装置事故。整流柜绝缘不良造成短路停机;快速熔断器与整流元件特性配合不良,在直流侧短路时造成整流元件大量损坏;因整流柜冷却风机故障造成风温升高,而使整流装置退出运行,造成发电机降负荷甚至解列等。



阻抗轨迹图

## 2.2 失磁的危害

发电机正常运行时,向系统送出无功功率,失磁后则从系统中吸取大量的无功功率,使机端电压下降,严重状态下可能会使电压降低到允许值以下,从而破坏了系统的稳定性。发电机电流增大情况下,如果失磁前送有功愈多,那么失磁后电流增大也就愈多。为了供给失磁发电机无功功率,可能导致造成系统中其他发电机产生过流。

失磁对发电机自身也有影响。发电机一旦失磁,其转子和定子磁场间出现转差,因而在转子回路中感应出转差频率电流,致使转子局部过热。发电机受交变的异步电磁力矩的冲击而发生振动,转差率愈大,振动也愈厉害。

## 3 失磁保护原理<sup>[2]</sup>

当前国内外发电机失磁保护装置中,用得最多的是装设在机端的阻抗继电器。

### 3.1 失磁初始阶段(静稳破坏前)机端阻抗轨迹

失磁初始阶段(静稳破坏前)机端阻抗轨迹是一个以 $[U_s^2/2P_s, jX_s]$ 为圆心( $O_1$ ), $U_s^2/2P_s$ 为半径的等有功阻抗圆。从发电机失磁故障开始,到静稳破坏前一段时间内,其有功功率基本不变,同时充分利用系统电压 $U_s$ 恒定,系统阻抗 $X_s$ 为给定值,可得出机端测量阻抗为 $Z=(U_s^2/2P_s+jX_s)+(U_s^2/2P_s)e^{j2\phi}$ 。如图中圆1所示:

### 3.2 静稳极限机端阻抗轨迹

静稳极限机端阻抗轨迹是一个以 $[0, -j(X_d - X_x)/2]$ 为圆心( $O_2$ ), $(X_d + X_x)/2$ 为半径的静稳极限阻抗圆。装设在发电机机端的阻抗继电器,观测点在机端(即阻抗坐标中的原点 $O$ ),由此点向系统观测到的是 $jX_s$ 。由于讨论的是发电机尚处于静态稳定的边界,所以发电机还没有失去同步,由机端向发电机观测到的参数应是 $-jX_d$ ,即大小是同步电抗 $X_d$ ,但处于相反方向。以 $jX_s$ 和 $-jX_d$ 两点为直径作圆,就是汽轮发电机失磁后到达静稳极限时的机端阻抗边界,如图中圆2所示。若机端阻抗进入此圆内,则表明发电机已超过静稳极限,不再能同步

运行。

### 3.3 发电机失磁后最终转入异步运行时的阻抗轨迹

发电机失磁后最终转入异步运行时的阻抗轨迹是一个以 $[0, -j(X_d + X'_d)/2]$ 为圆心( $O_3$ ), $(X_d - X'_d)/2$ 为半径的异步边界阻抗圆。失磁的发电机,由同步运行最终转入异步运行,发电机的参数将在 $X_d$ 与 $X''_d$ 间随滑差变化,滑差越大,越接近 $X''_d$ ,滑差为零(即同步)时,参数为 $X_d$ ,因此失磁发电机的参数以同步电抗 $X_d$ 为极限,不可能超越同步电抗值。为了检测发电机失磁后的异步运行状态,在机端装设异步边界阻抗继电器,其阻抗特性圆如图中圆3所示。它以 $-jX'_d/2$ 和 $-jX_d$ 两点为直径作圆,若进入圆内则表明发电机已进入异步运行。该阻抗圆在第三、第四象限,其阻抗动作圆一定小于静稳极限阻抗圆,所以同一台发电机在同一工况的系统中运行,若失磁保护采用静稳极限阻抗继电器,则在失磁故障时一定比采用异步边界阻抗继电器的动作早,但前者比后者的误动概率高。

### 3.4 失磁保护的常用动作判据

(1) 系统侧主判据。三相同时低电压判据(为防止失磁时系统电压并不降低的影响,宜采取发电机机端侧电压)。

(2) 发电机侧主判据。异步边界阻抗动作判据;静稳极限阻抗动作判据;静稳极限励磁低电压动作判据,即 $U_e - P$ 判据。

(3) 辅助判据。负序电压元件;励磁低电压元件;延时元件。

### 3.5 出口方式

发电机失磁保护动作后,考虑到对系统及机组本身的影响,一般都动作于解列灭磁,即跳开发电机并网主开关、励磁开关及厂用电进线开关(由快切装置自动切到备用变负荷),失磁发电机与系统解列灭磁。

### 3.6 负荷中心与远离负荷中心机组的失磁判据的选择

据最新反措要求,发电机的失磁保护应使用能



正确区分短路故障和失磁故障的、具备复合判据的二段式方案。优先采用定子阻抗判据与机端低电压的复合判据，若与系统联系较紧密的机组宜将定子阻抗判据整定为异步阻抗圆，经第一时限动作出口；为确保各种失磁故障均能被切除，宜使用不经低电压闭锁的、稍长延时的定子阻抗判据经第二时限出口。处于系统负荷中心的机组，其系统阻抗较小，从上述失磁圆特性可以看出，为防止失磁保护的误动，宜采用异步圆判据。对于远离负荷中心的机组，其系统阻抗较大，为保证机组失磁后能正确动作不致引起系统振荡，则可采用静稳圆判据。

### 3.7 失磁保护主判据的误动问题及应对方法<sup>[3]</sup>

(1) 外部经过渡电阻发生不对称短路。发电机外部发生短路时，只要过渡电阻足够大，低励失磁保护中的阻抗继电器（包括准异步边界判据）是可能发生误动的，但异步边界阻抗继电器的误动概率并不大。为防止这种误动的发生，需增设失磁保护的辅助判据，即负序电压元件、励磁低电压元件和延时元件判据。

(2) 系统振荡。显而易见，不论系统发生稳定振荡还是失步振荡，当机端测量阻抗在第四象限由右向远方进入动作边界内时（包括动作区域最小、最下方的异步边界），都可能造成失磁保护的误动。为防止误动尤其是系统稳步振荡下误动的发生，则可增设延时的措施，延时大小可按照振荡阻抗轨迹在阻抗动作圆内停留的时间长短来决定（可参考系统给出的振荡周期长短来决定）。

(3) 长线充电。发变组接架空长线时，长线的对地电容使发电机机端测量阻抗呈容性，若落在阻抗平面的第四象限，失磁保护阻抗继电器可能误动，利用过电压继电器进行闭锁可以防止这种误动的发生（以静稳极限励磁低电压动作判据 $U_e-P$ 为主判据的失磁保护，不会在长线充电工况下发生误动，因为此时功率很小）。

(4) TV电压回路断线。电压互感器（TV）一

次或二次回路断线，各种接线方式的失磁保护阻抗继电器均有可能误动，不过 $0^\circ$ 接线方式的异步边界阻抗继电器稍好些，因此一般可增设电压断线比锁装置。

(5) 发电机自同步过程的影响。这种并网运行方式尤其在汽轮发电机组中很少采用。从发电机合闸到给上励磁的一段时间内，发电机表现为失磁状态，误动是不可避免的。从运行手段而言只需打开失磁出口联片，待加上励磁发电机与系统同步后，再投入失磁保护即可。

### 3.8 失磁保护与失步保护的差别

随着电力工业近年的迅猛发展，高参数大容量的大型、特大型机组相继建成投产，其发电机同步电抗参数都较大，而与之相连的系统电抗却总是较小。当系统发生振荡时，振荡中心往往会落入在发电机—变压器组内部，使得机端电压随振荡而大幅波动，严重影响厂内动力设备的出力；同时，当失步振荡电流可与三相短路电流比拟，且振荡电流在较长时间内反复出现时，则会使发电机组遭受力和热的损伤，造成大轴扭伤，应装设失步保护。失磁保护虽然能够检测失步故障，但失步故障并非均由低励失磁引起的，所以失磁保护不能代替失步保护。失磁保护是防止发变组内部由于励磁系统故障对本机组及相邻机组产生损害而设置的，其损害是由内到外。失步保护是为预防系统振荡对本机组产生损坏而设置的保护，故其动作后的行为应由系统安全稳定运行的要求决定，不应立即动作于跳闸；在判别出是失步振荡而非稳定振荡后（判据还应能区分与短路的不同），且在振荡次数和持续时间超过规定值时，才在切断电流较小的时刻使发电机动作于跳闸。

## 4 发电机失磁后的异步运行

发电机在运行中，励磁回路因出现种种故障或事故，会造成全失磁或部分失磁。此时，是立即跳主开关甩负荷停机，还是让电机异步运行，寻找失

磁原因恢复励磁再同步,在电力工作者中存在着较大的分歧。多年来,经大量运行实践研究表明,发电机失磁转入异步运行后,迅速将有功功率减到0.4~0.5倍额定有功功率(以定子电流不超过额定值为准)就可在较低的转差率下稳态异步运行。因此,汽轮发电机允许失磁运行的条件是:①系统有足够供给发电机失磁运行的无功功率,以不致系统电压严重下降为限。②降低发电机有功功率的输出,使之能在很小的转差率下,在允许的一段时间内异步运行,即发电机应在较少的有功功率下失磁运行,使其不致危害发电机转子的发热与振动。

发电机失磁异步运行时需注意的问题<sup>[4]</sup>:

(1)系统的无功容量储备要足够。经现场汽轮发电机失磁异步运行的实测表明,失磁异步运行时,需从系统吸收的感性无功功率为异步输出的平均有功功率的1.7~2.38倍,以磁化转子形成异步转矩与输入转矩相平衡,将机械能转换成电能输出有功功率。因此,发电机失磁异步运行对系统的要求是无功储备要足够,否则会使系统电压骤降甚至失去稳定性。但是,随着电力系统容量增大,高电压、大电网,无功储备通常均可满足单台机组失磁异步运行的无功需求。

(2)定子端部金属结构件温度增高。发电机在运行中定子端部金属结构件温度的高低,除与应用的金属材质、结构、屏蔽方式有关外,还与发电机的运行方式及工况密切相关。发电机失磁异步运行是进相运行的极限情况,因此其端部金属结构件的温度,会比迟相、进相运行时的高,但不得超过我国有关发电机定子端部铁芯和金属结构件温度规定的限值。

(3)电机定子电流不能超过额定值。发电机同步运行时定子电流是由同步电抗 $X_d$ 确定的,异步运行时在小转差率范围内,当转差率 $S$ 增大时, $X_{d(s)}$ 减小(基本上由暂态电抗 $X_d'$ 确定),故会引起定子电流急剧增加。此时若发电机仍输出额定有功功率异步运行,定子电流必超过额定值。因此,若发

电机在额定有功功率下失磁异步运行时,要迅速将有功功率减小到额定有功功率的0.4~0.5倍,以定子电流不超过额定值为限,让其稳定异步运行。

(4)转差率的大小。汽轮发电机失磁异步运行时,其转差率的大小除与输出有功功率有关外,还与转子绕组的接线方式有关。实验数据表明,在不同接线方式下失磁运行时,转差率的变化范围为0.083%~1.235%(转子绕组开路),远小于3%~5%。

(5)滑频电流在转子中的分布。在异步运行状态,转子中感生的滑频电流频率极低,范围一般仅有0.0415~0.6175Hz(仅在转子绕组开路状态才能出现)。因此滑频电流(近似于直流)无集肤效应,在转子中的渗透是很深的,可谓遍布转子本体。而发电机在不对称状态运行时,负序旋转磁场在转子部件感生的主要为2倍频(100Hz)涡流,因转子本体强阻尼作用和电流集肤效应的结果,其渗透深度约为20mm,分布规律是端部护环嵌面(阻尼环)最大,约为定子负序电流 $I_2$ 的7倍;大齿面上的次之,约为 $I_2$ 的5.5倍;紧靠大齿嵌线槽槽楔中的次之,约为 $I_2$ 的5.3倍。因此,两者是截然不同的,危害也不一样,后者更大,绝对不可把二者混淆。

(6)附加损耗在转子本体中的分布。由于汽轮发电机在失磁异步运行下,转子中产生的滑频电流是遍布转子本体各部的,因此转子中的附加总损耗,也是与滑频电流的分布相对应的。汽轮发电机失磁异步运行时,无论转子绕组的接线方式如何,承受损耗最多的部位均在转子轭部或齿部,绕组中最多的仅占总损耗的1/3,其余2/3均由转子轭部、齿部和槽楔分担了。这与正常运行时绕组中施加直流,产生励磁铜损耗( $I_2 R_r$ )并集中于转子绕组中,使其发热是完全不一样的。因此,认为汽轮发电机异步运行时其总损耗不能超过额定励磁损耗的观点是不全面的,由它来作失磁异步运行的判据更为不妥。因为发电机在异步运行状态下,转子绕组分担的损耗较少,绝不会引起过热。



## 5 ABB发电机组失磁保护配置及异步运行的可行性

国华北京热电厂的发电机系ABB公司生产的SWX23Z-109LL型号空冷机组,发变组保护装置为ABB的REG216型发电机保护。发电机失磁保护按照发电机异步边界阻抗圆整定,其整定值在jX轴上为 $(-X'_d/2) = -0.13U_n//_n$ ,  $(-X_d) = -2.49U_n//_n$ ,跳闸延时2s,整组保护返回延时6s。因该厂位于北京CBD区域,属特大城市的负荷中心,故失磁后采取异步边界阻抗圆作为判据是完全合理的。<sup>[5]</sup>

该厂发变组失磁后保护的出口方式了解列灭磁,而没有采取异步运行的方式,是由该厂在系统中所处的位置决定的。首先,异步运行从系统吸收大量无功以提供有限的有功,会对系统造成电压降低、相邻机组过负荷以及其他扩大性影响。对于一个对技术稳定性要求极高的地区电网来说,这是存在着一定风险的。其次,虽然异步运行在技术分析上是完全可行的,但在实际运行中是否会出现其他情况,还需从运行实践中积累经验。再次,随着电力建设步伐的急剧加快,供电能力不断增强,采用异步运行对于一个供给相对充足的电网来说方式还不是很迫切的。最后,该厂2台机组的总装机容量为400MW,对于负荷需求为21000MW且有着足够联网功率支撑的地区电网来说,即使需要采用异步运行来提供有功功率,所能提供的负荷也仅为200MW(约50%额定容量),对于缓解负荷需求作用有限。

但是,在电网发生大规模事故失去外部电源的情况下,作为政治保电的负荷中心支撑电厂,若急需采用异步运行方式也是可行的。

异步运行作为一种发电机设计上允许的运行方式,对其做一些可行性探讨,可以加深我们对发电机物理性能及运行工况的理解。发电机进相运行是一种同步低励磁的持续稳定运行方式,在进相运行时,发电机发出有功功率的同时,可不发或从系统中吸收无功功率,这是解决电网低谷运行

期间电压过高、无功过剩的一种简便的、可行的、经济性较高的运行方式。异步运行的实质就是发电机进相运行的极限形式,其不同之处就在于转子的励磁磁场需要完全由定子电流的电枢反应来建立,而进相运行的气隙磁场则是转子磁场(直流建立的)与电枢反应的合成磁场。

## 6 结论

发电机的异步运行,作为一种非常规的运行方式,在理论上是完全可行的,鉴于我国电网目前运行的工况及高速发展中稳定性的要求,要推广应用这一方式,还需要进行大量的小范围内的试验性工作;但是在外部电源全部中断的特殊紧急情况下,如需异步运行,只要控制得当,异步运行的发电机组能够提供必要的电源支撑,保证负荷中心重要负荷的供电,从这方面来说,尤其对于优化调度运行,探讨发电机的异步运行还是很有借鉴意义的。■

## 参考文献

- [1] 罗志强.2008年国家电网安全运行情况分析.国家电网电力调度通信中心,2009.5.
- [2] 王维俭.发电机变压器继电保护应用(第二版).中国电力出版社,2005.1.
- [3] 张洁.华北电力技术.华北电力科学研究院,2010.10.
- [4] 周德贵.发电机失磁异步运行的问题分析.四川电力试验研究院,2007.5.
- [5] 李海争.ABB 200MW双抽供热机组维护手册.神华国华北京热电厂,第十七卷,2008.4.

## 作者简介

李海争(1980— ),男,神华国华北京热电厂工程师,主要从事继电保护工作。