

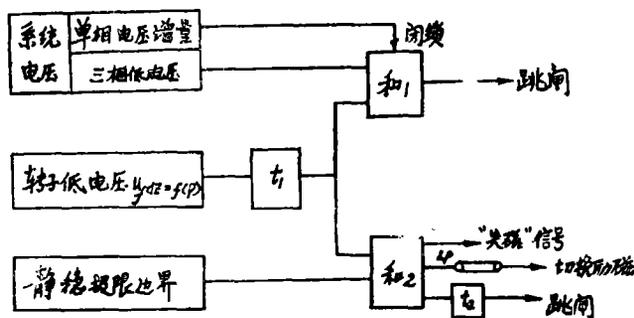
大型水轮发电机失磁保护新方案

清华大学电机工程系 王维俭
许昌继电器研究所 涂东泽
水利水电科学院自动化所 许可达

一、前言

由我国自行设计、制造和施工的黄河上游某大型水电站，单机容量大，在陕甘青电网中将起重大作用。在首机投运初期，系统容量相对较小，联系电抗又很大，对于失磁保护，会有一些特殊的要求。从首机投运初期至最终建成，大型水轮发电机的失磁将有不同的特点。为了设计一套能适应各阶段不同情况的、性能可靠的失磁保护方案，我们用大型模拟计算机进行了不同运行时期的各种失磁方式的仿真计算。在分析失磁过程中各电量变化规律的基础上提出了大型水轮发电机失磁保护的新方案，并经制造、设计、运行部门的有关同志共同讨论，使保护方案得到了进一步完善。

二、保护方案框图及整定值



图一 某大型水轮发电机失磁保护方案框图

建议的保护整定值：

1、系统电压

$$(1) \text{单相电压增量 } \left| \frac{du}{dt} \right| = 1.7 p.u. / \text{秒} \textcircled{1}$$

① p.u.表示标么值，以额定电压为基值。

- (2) 三相低电压 首机运行初期 $0.7 \sim 0.75 p.u.$
 首机满发及多机运行时期 $0.8 p.u.$

2、转子低电压及延时

(1) 随 p 变转子低电压

整定公式 $u_{fdz} = \frac{x_{d\Sigma} r_f}{x_{\sigma d}} P$ 、当 $P \leq \frac{x_{\sigma d}}{r_f x_{d\Sigma}} u_{fo}$ 时 $u_{fdy} = u_{fo}$ ①

(2) 延时 t_1 $0.5 \sim 0.8$ 秒

3、静稳极限边界

首机运行时期：有限系统静稳极限苹果形阻抗园（图 2 中曲线 2）

多机运行时期：静稳极限苹果形阻抗园（图 2 中曲线 1）

4、延时 t_2 $1 \sim 2$ 秒

5、连接片“LP”自动切换励磁时投入

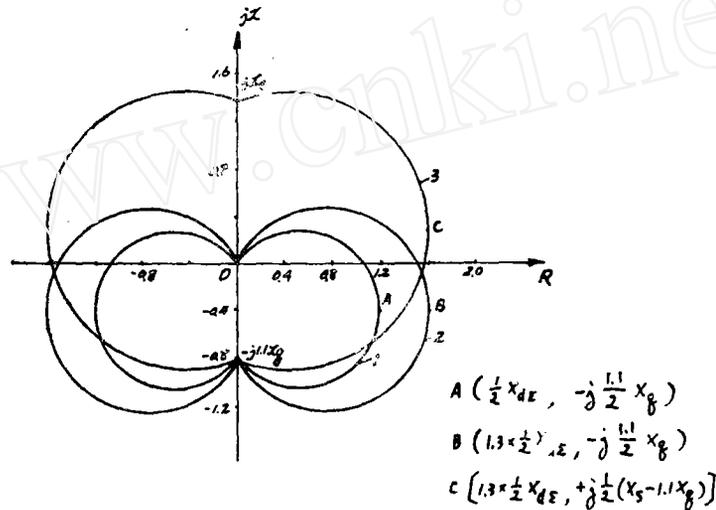


图 2 各种静稳极限边界。

- 1—静稳极限苹果形阻抗园。
- 2—有限系统静稳极限苹果形阻抗园。
- 3—有限系统静稳极限大苹果形阻抗园。

三、保护方案的特点

1、关于系统低电压判据：

失磁保护既是机组保护，也是系统保护，它必须在发电机失磁后系统电压下降严重时迅速跳开失磁机，而不致威胁系统安全。特别是在首机运行时期，系统容量相对较

① u_{fo} 空载励磁电压

小, 联系电抗又较大时, 大型水轮发电机失磁后, 主变高压侧母线电压下降很快, 系统低电压判据是很重要的主判据。

在首机运行初期, 发电机不能满发, 当发生全失磁故障时, 系统三相低电压元件比静稳极限元件先动作。而失磁一开始, 转子电压就降为零(短路失磁)或变为负值(开路失磁), 转子低电压(随 p 变)元件能立即动作, 只要主变高压侧母线电压 U_T 一降到整定值, 便立即将失磁发电机跳闸。对于较严重的部分失磁故障, 由于联系电抗很大, 也往往是系统三相低电压判据先动作, 由于采用了随 P 变的转子低电压判据, 所以能较早地满足, 只要 U_T 一降到整定值, 就能立即跳闸, 有效地保证了系统安全。考虑到失磁机组远离负荷中心, 其高压母线电压的下降对负荷中心电压下降影响不大, 所以可将系统三相低电压判据的整定值适当降低一点, 例如取 $0.7\sim 0.75p.u.$

当首机满发时, 系统联系电抗减小了, 当多机运行时, 联系电抗更小, 同时由于有健全的相邻机组, 它们又有较强的自动电压调节器, 所以这二种情况下, 失磁后在机端阻抗轨迹进入静稳极限边界时, 高压母线电压一般高于 $0.8p.u.$, 系统三相低电压判据的作用降低了, 但仍有保留此判据的必要。因为: 一则, 在异步运行过程中, U_T 仍有可能下降到较低值; 二则, 邻近健全机的电压调节器可能会由于各种原因暂时退出运行, 失磁后高压母线电压就会下降到较低值; 三则, 电站在枯水季节有可能仍为单机运行, 最小运行方式时系统联系电抗也可能不太小; 因此, 为了保证系统的安全运行, 有必要在确切判断由于失磁且 $U_T < 0.8p.u.$ 立即将失磁发电机跳闸。

对于各种不对称短路故障, 系统不可能三相同步低电压, 失磁保护不会误动, 在自励磁系统的发电机机端近处三相短路时, 系统三相低电压判据和转子低电压判据均会满足, 但延时 t_1 大于发一变组和超高压输电线主保护的動作时间, 所以失磁保护并不会无选择性动作。如果在超高压输电线上发生三相短路, 线路主保护或开关拒动, 为了防止因失磁保护“和1”动作而全部切机的严重后果, 采用系统电压增量闭锁“和1”的方案。虽然系统短路故障和发电机失磁故障都会造成 U_T 下降, 但是前者的 $\left|\frac{du}{dt}\right|$ 大, 后者的 $\left|\frac{du}{dt}\right|$ 小, 即使是失磁故障中电量变化最剧烈的开路失磁, $\left|\frac{du}{dt}\right|$ 也远比系统短路故障时小得多。根据计算, 取整定值 $1.7p.u./秒$, 就能区分短路故障与失磁故障。

2、关于静稳极限判据

水轮发电机的理论静稳极限边界是一滴状曲线, 用主要位于第Ⅲ、Ⅳ象限的苹果形阻抗园作为继电器动作范围能较好地符合静稳极限边界。这是在经过联系电抗 x_s 接于无穷大电网时的情况。

如果失磁机占系统总容量比例较大, 而且系统的无功储备水平较低, 调节器的调节能力较差, 则大型水轮发电机失磁后, 对侧枢纽变电所的母线电压下降会大于5%, 此时对侧系统不应再看成电压恒定的无穷大系统, 而应当看成是有限系统。

计算证明, 大型水轮发电机在有限系统中失磁的静稳极限边界, 比单机对无穷大系统的静稳极限边界有明显的向上和左右扩展的趋势。通过大量计算实例的统计, 边界扩展大约为20%~30%。首机投运初期, 系统的情况是典型的有限系统, 因此必须适当扩

大阻抗继电器的整定范围,才能及时检出失磁故障,较好地符合静稳极限判据的设计原则。

当联系电抗 x_s 很大,重负荷下失磁时,机端测量阻抗轨迹会由第I象限先进入第II象限,然后再到第III、IV象限,如果用包括 $(0, jx_s)$ 在内的大苹果形阻抗园(图2中曲线3),则能及早判别出失磁故障。但是考虑到该电站投运初期的实际情况,不可能带很大负荷,初步估计将小于 $0.3p.u.$,这时,失磁后机端测量阻抗轨迹仍是由第I象限直接经第IV象限而进入静稳极限边界的,所以只要用过原点的有限系统静稳极限苹果园就行了。

多机运行期间,由于相邻健全机组有较强的电压调节器,所以即使相邻机组与失磁机等容量,对侧系统为有限系统,失磁后相邻健全机的机端电压下降也不大于5%,而且相邻机与系统等值机之间的功角基本不摆开,实测的失磁机静稳极限边界基本与单机对无穷大系统的静稳极限边界吻合,所以多机运行期间,只须用静稳极限苹果园就可以了,不须修正扩大。

多机运行时期的振荡仿真计算表明:在邻近机容量小(特别是不带电压调节器),对侧系统容量小,联系电抗小,短路前进相运行,短路持续时间又较长,切除后系统发生非同步振荡时,机端测量阻抗轨迹在静稳极限苹果园内的时间最长,但是满足转子低电压(随 p 变)判据的时间都小于 $0.5s$,所以用 $t_1 = 0.5s \sim 0.8s$ 完全可以防止振荡时失磁保护误动作。

3、关于转子低电压辅助判据

定子判据虽然反映出失磁机运行状况的根本性变化以及对系统安全的影响,但并不是充分的。在很多非失磁异常工况下,定子判据也会满足,所以必须加辅助闭锁判据。转子低电压是失磁过程电量变化中很显著的特征之一,而且能和多种非失磁异常工况相区分,因此是一种比较灵敏可靠的辅助判据。

转子低电压判据最困难的是整定值的选择,目前国内生产和应用的是固定整定值的转子低电压判据。其整定值一种是沿用德国西门子公司的 $0.8u_f$,一种取在额定功率下到达静稳极限的最小转子电压值。

计算实例发现,对于大型水轮发电机在重负荷下的部分失磁故障, $0.8u_f$ 的定值是偏低的。因为发生部分失磁故障时,转子低电压判据比静稳极限判据动作要晚得多,这样就不能按静稳极限的要求来及时判明失磁故障。即使把整定值提高到 $1.0u_f$,也不行。特别是首机运行初期,联系电抗很大的情况下,失磁发电机到达静稳极限时, $0.8 \sim 1.0u_f$ 定值的转子低电压判据尚不动作,当转子低电压判据动作时,主变高压侧母线电压已很低,严重威胁系统的安全运行。当部分失磁较轻(剩磁大,衰减慢)时,上述情况更严重,造成失磁保护动作过晚甚至拒动。如果用定值较高的第二种整定原则,当发电机轻载运行,无功进相不大时,转子电压已经接近整定值,这样正常进相运行时,转子低电压判据就会满足,起不到闭锁作用。为此,对于大型水轮发电机,必须采用定值随 P 变的转子低电压判据,它能保证在各个运行时期、各种部分失磁情况下,转子低电压判据和静稳极限判据很好地配合,即转子低电压判据先动作,待机端测量阻

抗一到达静稳极限边界,保护装置就能及时动作于切换励磁,同时又能起到非失磁故障时的闭锁作用。

延时 t_1 是为了防止在由于非失磁原因引起系统振荡时,转子电压会短时低于整定值而造成误动作。由于采用了随 P 变化的高定值,计算表明,转子低电压判据会比静稳极限判据早动作,因此将延时 t_1 直接放在转子低电压判据之后,并适当加大至 $0.5\sim 0.8''$,既不影响保护装置的及时动作,又能可靠地防止系统振荡时保护装置的误动作。

随 P 变转子低电压的整定公式,我们认为可以粗略地用隐极机的公式 $u_{fdz} = \frac{x_{d2} r_f}{x_{d2}} P$,

原因是(1) u_{fdz} 除与失磁机组的参数 x_{d2} , x_d , r_f 有关外,还与联系电抗 x_s 及发电机有功有关。现在实现了 u_{fdz} 与 P 的跟踪应变关系,但是运行方式的频繁变化引起 x_s 的变化并未反映到 u_{fdz} 中去,一般情况下是采用经常可能的最小运行方式时的 x_s 来整定,所以 u_{fdz}

本身就是比较粗糙和保守的。(2) 暂态过程中励磁绕组的电压方程是 $u_f = \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f$,失磁过程中 $\frac{d\psi_f}{dt} < 0$ 而且可达 $r_f i_f$ 同一数量级,但是计算 $\frac{d\psi_f}{dt}$ 很困难,所以通常只考虑 $u_f = r_f i_f$,这样算出的整定值偏高一些,使发电机发生部分失磁故障以后,转子低电压判据先于静稳极限边界动作。鉴于上述两个原因,用简单公式整定是可行的。由于这种直线过原点(实际上凸极机由于存在反应功率不会过原点),在轻负荷下部分失磁,定值随 P 变的转子判据反而比固定定值($1.0u_{f0}$)动作得晚,因此宜用折线形的动作特性。(图3)装置制造也并不困难。

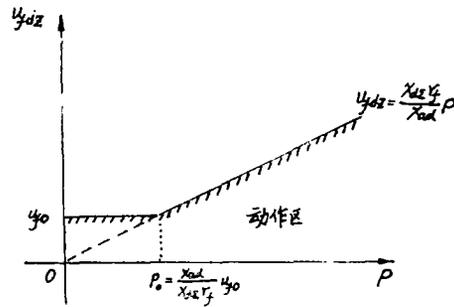


图3 转子低电压判据动作特性

在首机投运初期,联系电抗很大,开路失磁时,电压 U_f 低于 $0.7p.u.$ 的时间会比 $0.5''\sim 0.8''$ 更短,为了保护系统安全,可另用固定低定值 $0.2u_{f0}$ 的转子低电压判据与系统电压判据构成“和1”动作于跳闸。因为定值很低,非失磁故障时不易误动,所以只须用极短的延时($t=0.2''$)就可防止在系统振荡时自并激发电机转子电压会短时很低而引起的误动。这就成了两级定值的转子低电压判据。考虑到开路失磁机率较小,首机运行初期远离系统中心的发电机带轻负荷,失磁不致对系统带来很大影响,一般不必增加这一固定低定值环节,仍用一个随 P 变的转子低电压判据即可。

4. 其他:

对于水轮发电机,目前尚无减有功出力的比较成熟的经验,所以只建议采用切换励磁的措施。切换励磁时对电机和系统的冲击如何?切换前要不要减少有功,尚待进一步分析研究。

若切换励磁措施无效,由于水轮发电机不允许异步运行,因此经过延时 t_2 去跳闸。 t_2 要考虑到自动切换励磁所需时间以及转子电压恢复时间,根据计算,建议取 $1\sim 2''$ 。

除了短路、振荡外,对于电压回路断线、系统频率降低等非失磁故障,保护均不会误动。经计算,正常情况下线路空载长线充电,该电站是不会发生失磁保护误动作的。事故情况下,超过一定长度的长线空载充电有可能引起发电机减磁,失磁保护误动;转子线圈内部开焊断线,失磁保护拒动;这二种故障极为罕见,所以就不再多考虑而增加装置的复杂性了。

四、对邻近健全机的影响

一台大型水轮发电机发生失磁故障,与它同一高压母线的相邻健全机的电量变化有何规律?它的各种保护是否会误动,这是应该注意的问题。

1、计算结果表明:邻近健全机的机端测量阻抗轨迹都是在第I象限向左下方(或左上方)移动,逐步逼近虚轴。在失磁机异步运行时,它也摆动。若相邻为同容量的一台健全机,则实部大约在 $0.05\sim 0.2p.u$,很少情况会摆动到负值;虚部大约在 $0.4\sim 0.6p.u$ 范围内。若相邻健全机为三台时,每台健全机机端测量阻抗的实部大约在 $0.2\sim 0.5p.u$ 范围内,虚部大约在 $0.78\sim 1.8p.u$ 范围内。邻近机的转子电压是升高的,所以,邻近机失磁保护的定子判据和转子判据均不会满足,失磁保护是不会误动作的。但是有必要检查一下后备保护的动作情况。

2、计算结果还表明:邻近机只要带有自动电压调节器,其机端电压的下降一般都比较小,邻近机与等值机之间功角不摆开。若不投入自动电压调节器,则机端电压将有不同程度的较大下降。当联系电抗大,邻近机容量小,对侧系统容量也小时,机端电压严重下降,甚至到达 $0.5\sim 0.6p.u$,此时邻近机与等值机之间的功角摆开也大,造成彼此间失步。

邻近机的有功很长一段时间基本保持不变,一直到失磁机已异步运行时,邻近机的有功才摆动。失磁机的无功缺额基本上由邻近机的无功增长来弥补,对侧为无穷大系统,联系电抗较小时,当然一部分无功缺额是由对侧系统补充的。

邻近机定子电流会上升。最严重的情况是邻近机容量小,联系电抗大,对侧系统容量也小时,一般可达 $1.6\sim 1.8$ 倍额定电流,最大达 2.5 倍额定电流,要考虑其定子过流保护和定子过负荷保护是否会动作。

3、计算结果同时表明:邻近机仅一台时,由于补充无功缺额,转子电流会较长时间地超过额定值 i_{fN} ,甚至上升到 $1.5i_{fN}$ 。但是基本都是在失磁机的阻抗轨迹到达静稳极限边界以后,邻近机的转子电流才上升到 $1.5i_{fN}$,所以只要失磁保护及时动作,邻近机就不会由于转子电流上升过大而引起转子过负荷保护动作。邻近机的转子电压只是在邻近机容量小,联系电抗大,对侧系统容量小时,且失磁机是重负荷下失磁,才会升高到强励顶值。其他较为轻松的情况下,强励一般不会动作。要注意到邻近机强励的允许时间,失磁机必须在该时间内处理(恢复励磁或切机)完毕。

五、结束语

通过仿真计算和分析,我们初步总结了有限系统及有相邻健全机时失磁的特点,制定了能适应各个运行阶段系统特点的大型水轮发电机失磁保护方案。



简 讯

主设备用保护继电器鉴定会在苏州召开

机械工业部和水利电力工业部于1983年3月9—14日在苏州召开了主设备用保护继电器的鉴定会,对许昌、阿城和上海继电器的产品进行鉴定。会议由机械部电工局和水电部科技司、生产司主持,参加会议的有制造、科研、设计、运行、高等院校等69个单位的代表111名。

会议之前,两部曾于1981—1982年组织抽查试验小组,对许昌、阿城和上海继电器厂申请鉴定的产品进行了全面检查和试验,并提出鉴定测试报告。

会议期间,由机械部电工局、水电部科技司、生产司以及制造、科研、设计、运行、高校等单位28名同志组成鉴定委员会。许昌、阿城和上海继电器厂分别向大会介绍了待鉴定产品的情况,运行单位介绍了各有关产品在富春江电厂、乌江渡电厂、葛洲坝电厂、焦作电厂、密云电厂、京西电厂、闵行电厂等的运行情况,抽查试验小组介绍了各继电器厂有关产品的鉴定测试情况。与会代表本着严格要求,实事求是的精神,进行了认真讨论。根据《继电器及装置主要技术要求》和《主设备用保护继电器及装置试验大纲》对各产品进行了逐项审查。

经过与会代表讨论和鉴定委员会审议,鉴定合格的产品有:许昌继电器厂晶体管型继电器30种,整流型继电器13种;阿城继电器厂晶体管型继电器30种;上海继电器厂整流型继电器11种。会议认为:这些继电器吸取了国内生产实践的经验和成果,也学习了国外的成功经验,技术上是比较先进的,配套也比较完整。这是近十年来各继电器厂在工作中不断努力并在电力系统和高等院校等有关部门密切配合下所取得的巨大成果。上述鉴定合格的产品,各厂即将投入批量生产。