

发电机交流灭磁方式的探讨

山东电力工程咨询院 周 建 王 丽

【摘 要】 本文对常用的灭磁保护方式进行了简要分析，探讨其优缺点，分析灭磁状态下的电压关系。同时介绍了一种新型的灭磁保护方式，即交流灭磁。分析其发展过程，基本原理。并对碳化硅(SiC)压敏电阻和氧化锌(ZnO)压敏电阻作为非线性电阻灭磁的特点，作了初步的分析。

【关键词】 发电机 直流灭磁 交流灭磁 非线性电阻

1 前言

发电机内部故障时，虽然可以由继电保护装置迅速地把发电机与电力系统断开，但磁场电流产生的感应电势将继续维持故障电流。不论何种故障，如果时间较长，都可能严重损坏发电机，造成巨大经济损失。因此，灭磁就成为发电机励磁系统必须具备的基本功能之一。

灭磁是在发电机组的内部发生故障时，在转子绝缘允许的条件下，尽快地将发电机转子绕组中的励磁电流所产生的磁场减弱到尽可能小的过程。近年来大型同步发电机的灭磁方式，正在从传统的由直流灭磁开关构成的灭磁系统向以交流断路器构成的灭磁系统转移，在国内外一些机组中获得了应用，并取得了良好的业绩。本文将就灭磁方式及非线性电阻的特点作一初步的探讨。

2 直流灭磁

常规磁场断路器一般都串联在励磁直流回路中，目前国内大部分新建机组及老机组改造都选择灭磁开关配合 ZnO 非线性电阻的灭磁方案。其基本原理如图 1。

图中 LP 为励磁整流装置，MK 为灭磁开关，RF 为氧化锌非线性电阻， U_z 表示可控硅直流侧电压， U_k 表示灭磁开关弧压， U_L 表示灭磁非线性电阻的残压。FR 跨接于励磁绕组两端，发电机正常运行时，转子电压 U_L 较低，FR 呈高阻，漏电流仅微安量级。灭磁时 MK 开关，弧压 U_k 上升，导致 U_L 反向并升高，高至一定值时 FR 转为导通，励磁电流转入 FR 衰耗，MK 熄弧断开。

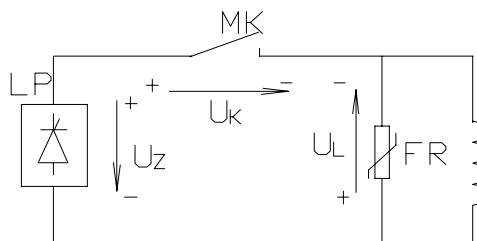


图 1 直流侧灭磁等效电路

这种以 MK 跳闸建立弧压，并击穿氧化锌非线性电阻 FR，以实现励磁电流由 MK 转移到 FR，来吸收转子磁能的灭磁方法，必须保证电压关系 $U_k - U_z > U_L$ 的成立。这是直流侧灭磁正常换流的必要条件。

根据公式 $U_k - U_z > U_L$ ，当直流开关用于非线性电阻灭磁系统时，对开关主触头断开时产生的弧压有严格的要求。为了建立更高的断口电压，以满足在灭磁时使非线性电阻导通并将励磁电流换流到灭磁回路中的要求，而使得开关的结构复杂化，在某些情况下，甚至要求开关具有两个或更多的串联主触头，这种专用的开关价格较高，市场较小，所以对生产及开发均带来了不利的影响。

3 交流灭磁

交流灭磁的一次原理电路图与图 1 相同，区别之处在于需要通过一中间继电器的分闸动作去切除励磁电源的可控

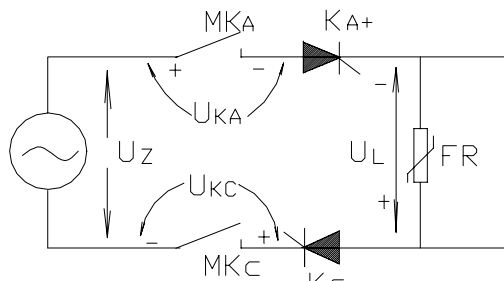


图 2 交流侧灭磁等效电路

硅触发脉冲（简称拉脉冲），然后跳灭磁开关。由于发电机转子是具有储能的大电感，其释能的时间常数为几秒量级，拉脉冲后，它相当于一直流恒流源，也就是使励磁电源的可控硅始终有两只导通、四只关断；由于可控硅触发脉冲被切除，四只关断的可控硅管不会再导通，但因转子的直流恒流源作用，两只导通的可控硅始终导通，且不可控；又因该直流恒流源的输出为单方向直流，两只导通的可控硅在此仅相当于导体。这就使得在与励磁电源输入端相连接的三相支路中有两相电流流过，一相无电流，此时，励磁电源相当于一交流恒压源，拉脉冲以后的电路图可以等效为如图 2 所示。这样电流回路由上述单相交流恒压源与转子形成的直流恒流源串联而形成闭合回路。当交流灭磁开关开断时，就使得交流开关的断口处产生弧压。利用上述交流开关断开时的弧压和励磁变压器所输出的单相交流电压的叠加，当满足条件 $U_k - U_z > U_L$ 时，励磁电流全部切换到 FR 中，随即使开关断口点熄弧-开关开断成功，这样就将发电机转子储存的磁能经 FR 释放，完成快速灭磁。

交流灭磁应同时具备两个条件：

1) 必须是可控硅全控整流桥而不能是二极管整流桥或带续流二极管的可控硅半控整流桥。

图 3 中有 KA、KB、KC，全部用整流二极管，或改成带续流二极管的半控整流桥，则交流开关 MK 开断后，励磁电流经二极管续流自然衰减，MK 轻松熄弧。但因转子回路电感大，电阻小，时间常数很大，二极管正向压降又很小，故励磁电流衰减缓慢，灭磁时间很长，起不到快速灭磁的保护作用。

2) 在开断 MK 的同时，封锁可控硅整流桥的全部触发脉冲。

流过 MK 三相断口的电流在任何瞬间只有二相通流，另一相电流为零。假定在 t_1 瞬间开断，此时可控硅管 KA+ 及 KC- 导通，其余均截止。如果仅开断 MK 而不封锁可控硅的触发脉冲，则 6 只管子的触发脉冲将按如下顺序施加于各可控硅管：+A，-C，+B，-A，+C，-B，现在 KA+ 及 KC- 两管已经触发导通，由于有电感 LQ 的续流作用，KA+ 及 KC- 有阳极电流大于维持电流，不能截止，开关断口 MK_A 及 MK_C 不能熄弧。B 相此时无电流，故 MK_B 轻松开断。接下来 KB+ 被触发，但此时 B 相阳极电源已开断，故 KB+ 不能导通，电流仍经 KA+ 及 KC- 流通，再过几毫秒 KA- 被触发，这时 KA- 的阳极电压已转为正向，故 KA- 立即导通，KC- 截止；励磁电流经 KA- 及 KA+ 短路续流，MK_A 及 MK_C 熄弧开断。这时又转为和上述二极管桥路一样，励磁电流经可控硅正向导通续流自然衰减，灭磁时间很长，起不到快速灭磁的保护作用。

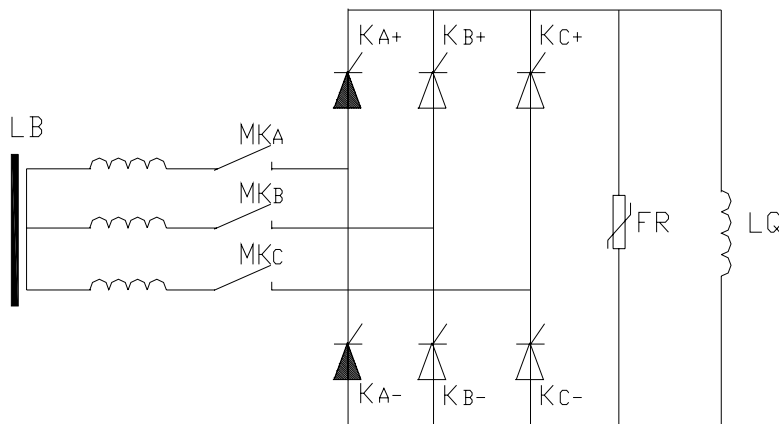


图3 交流侧灭磁接线图

由于有电感 LQ 的续流作用，KA+ 及 KC- 有阳极电流大于维持电流，不能截止，开关断口 MK_A 及 MK_C 不能熄弧。B 相此时无电流，故 MK_B 轻松开断。接下来 KB+ 被触发，但此时 B 相阳极电源已开断，故 KB+ 不能导通，电流仍经 KA+ 及 KC- 流通，再过几毫秒 KA- 被触发，这时 KA- 的阳极电压已转为正向，故 KA- 立即导通，KC- 截止；励磁电流经 KA- 及 KA+ 短路续流，MK_A 及 MK_C 熄弧开断。这时又转为和上述二极管桥路一样，励磁电流经可控硅正向导通续流自然衰减，灭磁时间很长，起不到快速灭磁的保护作用。

4 交流侧灭磁工况分析

假定在 t_1 瞬间分断 MK 开关同时封锁可控硅的触发脉冲，则 t_1 时刻导通的 KA+ 及 KC- 两管一直导通续流，而其他 4 只管子因无触发脉冲不再导通，这样回路的等效电路如图 2 所示。

将图 2 与图 1 相比，两者基本一样，区别如下：

- 1) 图 2 回路内串联了两个正向导通的可控硅管 KA+ 及 KC-，因其正向压降很小，故可忽略不计；
- 2) 图 2 中 MK 断口由两个串联，其弧压迭加 $U_k = U_{KA} + U_{KC}$ 和图 1 一个断口等效（直流侧也可以多断口

串联以求得较高弧压)；

3) 图 2 电源电压 U_z 极性交变而图 1 极性固定，这一点有原则的区别，因此满足非线性电阻击穿导通的条件应改为：

$$U_{KM} \pm U_z \geq U_{LM}$$

U_z 为电源电压瞬时值，可取正负号，取正号时交流灭磁与直流灭磁一样，而取负号则可大大降低对断路器弧压的要求。

MK 断口分离的瞬间是有随机性的。如分离瞬间正好 U_z 为负，则上式易满足，可成功换流；如分离瞬间 U_z 为正值，上式不满足，暂时不能换流，则断口电弧继续燃烧，等待换流条件的到来，因 50Hz 电网的周期仅 20ms，最多等待十几毫秒就满足上式可以换流。整个灭磁过程要几百毫秒，十几毫秒的等待时间是可以接受的。

5 交流侧灭磁的优点

把交流侧灭磁与直流侧灭磁进行比较，可以看出交流侧灭磁对弧压 U_k 的要求大大降低。断路器的弧压总有一定限制，为了提高弧压要采取一系列措施，如加强吹弧，增加灭弧栅片数，加大灭弧罩尺寸，以及多断口串联等，这些都会加大断路器的体积，重量及造价。降低弧压要求，也意味着降低断路器的体积、重量和造价，这是交流灭磁的主要优点。

6 非线性电阻

尽管国内外对采用非线性电阻灭磁已达成了共识，但在非线性电阻的选择上却有所不同。国外普遍选择了碳化硅 (SiC) 压敏电阻作为灭磁装置的非线性电阻，而国内却大多选择了氧化锌 (ZnO) 压敏电阻。

从电气特性来看，ZnO 的电流衰减将几乎恒定在较快的水平。而 SiC 的电流衰减的速度将随电流的减小而明显变慢。从而在整个灭磁时间上 ZnO 的要比 SiC 的短。如果采用相同的灭磁电阻和灭磁电压，则对灭磁时间来说，SiC 是 ZnO 的两倍。

ZnO 压敏电阻的非线性指数非常小，漏电流也比较小 (正常运行只有微安级)。因此它可以直接跨接在转子回路的两端，从而使接线简单，装置的动作迅速而可靠。而 SiC 压敏电阻的非线性指数比较大，漏电流也比较大 (正常运行时为毫安级)。因此它不能直接跨接于转子回路两端，而需要采用跨接器等投入环节，这将使装置的接线变复杂，降低了装置动作的迅速性与可靠性，同时也加大了装置维护的工作量。

在非线性电阻用于灭磁的初期，ZnO 的非线性特性较硬，灭磁时间较短，限压能力较强，但它的容量太低，容易老化而使特性系数发生变化，且对断路器的要求很高。可能是考虑到装置的通用性，使得国外研究人员最终选择了性能很稳定的 SiC 作为灭磁非线性电阻。但目前我国生产的 ZnO 电阻片在各方面性能已有了很大的突破，电阻片的容量大大提高。对于老化和寿命问题，只要严格控制选片、组片、装置的容量裕度选择恰当，它可以经受 500 次的额定冲击，其寿命可以大大提高。因此，就这一点来说，它完全可以很好地满足运行的要求。

另外，ZnO 击穿故障类型一般为短路形式，而 SiC 的则为开路形式。由于运行中非线性电阻的短路故障对励磁系统的危害较为严重，所以这一点也可能是国外研究人员不选择 ZnO 的另一原因。国内对这一问题的解决方法是，在 ZnO 支路串联快速熔断器。当 ZnO 电阻发生击穿故障时，熔断器立即响应，快速熔断，使故障支路退出工作，从而保证了整个装置的正常运行。为了可靠性，熔断丝的最小熔断值一般选择为支路 ZnO 电阻的极限容量，使得只有一片发生故障，熔断器就动作，以免故障扩大。考虑到有故障支路退出工作，因此在设计装置容量时要留有足够的裕度。

7 结论及建议

7.1 由于交流灭磁方式具有通过零点瞬时断弧的特点，在进一步取得运行经验的基础上，交流灭磁在未来的应用范围会更加广泛。

7.2 对于交流灭磁，保证磁场断路器正常换流的关键是其开断弧压足够高，在分断磁场断路器的同时封锁可控硅整流桥的触发脉冲能降低对断路器弧压的要求，有利于降低断路器的体积、重量及造价。

7.3 磁场断路器装于交流侧不适用于二极管整流桥和带续流二极管的半控整流桥，而且必须封锁可控硅整流桥的触发脉冲，装于直流侧没有此限制。

7.4 采用 ZnO 压敏电阻作为灭磁非线性电阻，在兼顾灭磁和过电压保护两种功能，严格控制转子绕组过电压值，尽量缩短灭磁时间，以求更好保证主设备等方面，其性能要明显优于 SiC 压敏电阻。只要合理设计，严格考核，ZnO 在寿命与性能老化上的限制将不会影响工程上对它的实际应用。但采用 ZnO 非线性电阻灭磁时，在线实时监测应能让运行人员及时了解灭磁装置的工作状态，特别是出现故障支路退出运行时应有报警信号。

注：本文发表在《中国电力规划设计协会电气专委会论文集》2005 年 9 月。