

水电机组电气制动的的设计及应用

陈遗志 刘国华 仲 旻 吕宏水

(国网南京自动化研究院电气控制研究所 江苏省南京市 210003)

【摘要】 简要论述了电气制动的原理,主要参数的设计方法,给出了软件设计及相应控制流程,以某厂的电气制动运行结果做了试验验证,得出相关结论。

【关键词】 电气制动 水轮发电机组 励磁 短路比

【数据库分类号】 SZ10

0 引言

近年来,长江、澜沧江、乌江等梯级流域相继开发,三峡、龙滩、小湾等单机 700 MW 巨型水轮发电机组正在设计和逐步投入实际运行中。巨型水轮发电机组的转动惯量很大,例如三峡机组转动惯量: $GD^2 \geq 450\ 000 T \times M^2$, 如此巨大的转动惯量,相应停机问题变得更加重视起来。水电机组在电网中普遍起着调频、调峰和事故备用的作用,其开、停机次数非常频繁,使用传统的投机械制动单一制动方式已经远远不能满足现代控制运行方式的要求,因此巨型水电机组有装设电气制动停机的重要性和紧迫性。目前三峡电站 26 台机组全部设计有电气制动系统。下面就电气制动中的设计和现场运行经验作些总结,以期抛砖引玉,引起专业工作者的重视。

传统的电气制动技术基本采用二极管整流提供发电机的励磁电流,但由于需增加独立一套二极管不可控整流装置,增加投资,目前该技术已很少使用。

柔性电气制动即变励磁电气制动是利用发电机励磁系统的调节器和可控硅整流器为机组制动时提供可控的制动电流。根据当时的水头、转速和导水叶的漏水量调整制动电流的大小来改变制动特性,其整个控制过程也是平滑可调的。

1 理论基础

在机组解列后,定子三相短路,向转子绕组中输入一恒定直流电流,则在定子中产生感应电流。该电流在定子绕组中产生铜耗制动力矩,使机组减速制动到停机。这里我们要强调的是定子中的短路电流 I_k 是一恒定值,不随机组转速下降而变化。因为根据同步电机理论可知:电气制动过程中,通过转子线圈的励磁电流是相对恒定的,故可以认为基波每极磁通量 φ 亦是恒定的。

$$E = 4.44 f W \varphi K_f = \frac{4.44}{60} P W \varphi K_f n = K_E n$$

$$X_d = \omega L = 2\pi f L = \frac{2\pi P n}{60} L = K_d n$$

$$I_k = \frac{E}{\sqrt{X_d^2 + R^2}} = \frac{K_E n}{\sqrt{(K_d n)^2 + R^2}} X_d R$$

$$I_k \approx \frac{E}{X_d} = \frac{K_E n}{K_d n} = \frac{K_E}{K_d} = \text{常数} \quad (1)$$

式中: E 为发电机组定子电势; R 为定子有效电阻; X_d 为发电机直轴同步电抗; n 为机组转速。

由同步电机理论电气制动力矩 M_E 可表达为:

$$M_E = \frac{P_E}{\omega_j} = \frac{3I_k^2 R}{2\pi n/60} = K_m \frac{n}{K_d^2 n^2 + R^2} \quad (2)$$

式中, P_E 为铜损耗功率; ω_j 为角速度, K_m 为常系数。

可见电磁转矩最大点在转速满足 $n=R/K_d$, 而转速在零时, 电磁转矩也为零。定性分析如下: 制动时磁通不饱和, 考虑制动时间比较长, 远大于发电机的瞬态、超瞬态时间常数, 稳态时近似双绕组变压器, 主要损耗是铜损, 而不是激磁电抗的铁损, 与正常短路升流一样特性。这一点从实际录波波形得到验证(见图3)。

从公式(2)可以得出结论: 由于 I_k 、 R 为常数, 电制动力矩是随机组转速下降而增大。由此可见电气制动的特性对低转速停机具有独特效果。电磁转矩与定子短路电流的平方成正比, 与机组转速成反比的关系, 因此, 增大定子短路电流对缩短停机时间是十分有效的。停机过程中的关键在于低转速区中机组转速下降陡度, 只要电气制动电流等于以至大于定子的额定电流, 电气制动在低速区能够获得令人满意的转速下降率, 同时也表明, 在正常停机运行的工况下, 仅用电气制动也是成功可靠的, 这一点在工程实践中已得到证明(见图5)。

2 参数计算及流程设计

2.1 主回路示意图

图1中, 在标准的自并励基础上, 增加制动变压器 BT, 励磁侧 S_1 开关, 制动侧 S_2 开关, 定子短路开关 FDK 内容, 其参数设计作详细说明如图1所示。

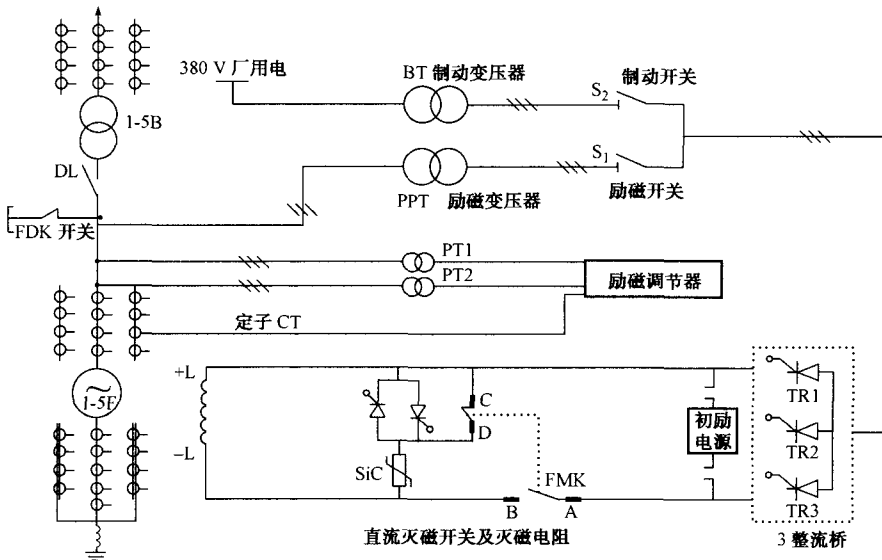


图1 电气制动停机主回路接线示意图

2.2 制动变压器设计

从理论上说, 如果可控硅能可靠导通, 能可靠关断, 且对励磁控制有足够的信任, 是可以不设计制动变压器的。直接将厂用380V通过开关切换到可控硅整流桥的交流侧。但这在实际工程中没

有采用,主要基于可靠性考虑:如果可控硅失控,导致直接后果定子过流会大大超过 1.5 倍,使定子线棒烧毁,这样为了节省励磁设计中制动造价而牺牲整个系统的可靠性得不偿失。所以,在设计制动变压器的时候,就有一个基准点:制动时,即使可控硅完全失控,可控硅输出的励磁电压及励磁电流不容许定子电流超过定子的热容量。以下以此为依据设计制动变压器。

制动变压器二次侧额定线电压的具体计算公式:

$$\frac{3\sqrt{2}}{\pi}U_f \cos \alpha_{\min} = K_i I_k R_f + \sum \Delta U \quad (3)$$

式中: U_f 为电气制动变压器二次侧额定线电压(此处应考虑厂用电的波动幅度如 $\pm 10\%$); α_{\min} 为励磁调节器输出控制角(一般最小角 α_{\min} 可放到在 $10^\circ \sim 15^\circ$); K_i 为短路电流过载系数; I_k 为定子短路时,产生额定的定子电流时,转子所对应的电流(即额定短路励磁电流); R_f 为转子电阻; $\sum \Delta U$ 为电压降之和,包括导通两臂的元件正向压降,可控硅换向压降,线路电阻压降及转子滑环与炭刷间的压降,计算中取 4 V。

说明:上式左边为六相全控整流桥输出的直流励磁电压,等式右边为转子稳态时的电压及线路的损耗。

首先是短路电流过载系数的确定。根据我国水轮发电机组技术条件规定:水轮发电机应能在额定负荷下承受 1.5 倍额定电流的短时过电流持续 2 min 而不损坏。而电气制动是在定子短路情况下,时间一般小于 10 min。按照定子热容量曲线,理论上发电机定子电气制动时定子电流取 1.0~1.3 倍额定电流是合理的, K_i 相应取 1.0~1.3。目前对电气制动时间快慢没有相关标准要求,所以工程上偏保守,取 1.0 倍额定电流左右居多。

其次,转子电阻大小,可取额定励磁电压/额定励磁电流作为转子绕组电阻考虑,也可以直接以 $100^\circ\text{C} \sim 130^\circ\text{C}$ 热态电阻输入,主要是考虑特殊工况,即带满负荷长期运行,后紧急跳闸,开始电气制动,此时转子温度没有冷却。

$$\text{如仅提供转子在 } 25^\circ\text{C} \text{ 时的电阻,可参照公式作修正: } R_{f(T_1)} = \frac{234.5 + T_1}{234.5 + T_2} R_{f(T_2)}。$$

再次,定子产生额定短路电流时转子对应的电流的计算,可通过短路比 I_k 求取,短路电流 $I_k = \frac{I_{k0}}{SCR}$ (I_{k0} 为空载励磁电流, SCR 为短路比),目前短路比随机组容量增大有变小的趋势,而水轮机由于转子散热条件相对较好,水电站的输电距离较长,稳定性问题比较突出,短路比设计的比较高,一般在 1.0~1.3 之间。如果用户无法提供短路比参数,可直接以空载励磁电流作为设计依据,此电流值偏大,设计得出的变压器二次电压偏高。

最后,在控制角设计上,考虑到完全失控时可控硅全导通,转子电流及电压都不要偏离正常工作点,即控制角度 0° 时,其输出为正常工作点电压的 $\frac{\cos 0^\circ}{\cos(10^\circ \times 15^\circ)} < 1.05$,所以制动变压器二次侧电压设计在满足 1.0~1.3 倍短路电流情况下取偏小的电压值有利于系统的安全可靠性。

$$\text{制动变压器二次侧线电流计算: } I_f = 1.1 \times \sqrt{\frac{2}{3}} \times I_k$$

$$\text{制动变压器额定容量计算: } S = \sqrt{3} \times U_f \times I_f$$

考虑整个制动过程小于 10 min 短时工作制,可取 1/2 容量,设计容量为 $\frac{1}{2}S$,此依据可参照变压器厂提供的曲线^{[1][2]},从变压器制造厂提供的功率曲线可以看出,变压器在初始负载为 0 情况下,短期 20 min 过载 2 倍功率。一般水电厂有多台机,如果错开各台机的停机时间,可考虑 2 台~3 台机共用 1 台制动变压器以节省费用。

2.3 电气制动流程设计

柔性电气制动的逻辑如图2,其制动过程:机组与系统解列—停机令到—电气制动启动条件满足—电气制动令到—闭锁机组保护—分 S_1 —合FDK—合 S_2 ;转子加电流;系统恢复过程:机组转速为零—分 S_2 —分FDK—合 S_1 —解除闭锁机组—系统恢复。

3 工程验证及波形分析

以某300 MW水轮发电机组为例,现场试验录波波形如图3~图5所示。

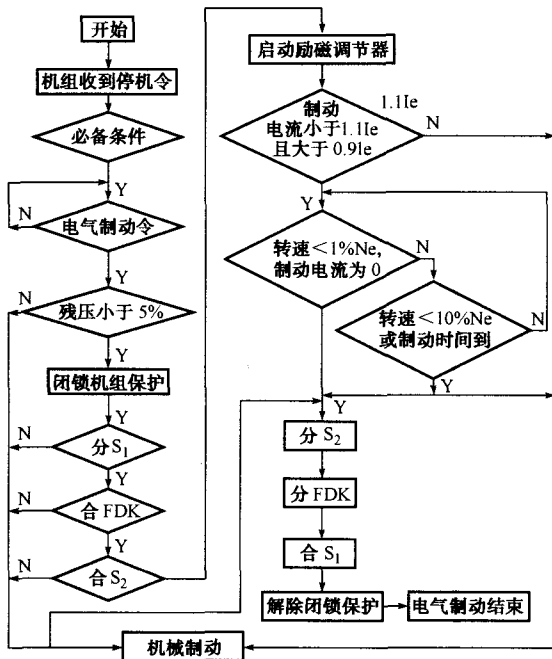


图2 电气制动顺序流程图

制动电流爬升过程如图3所示,可见整个过程平滑,充分体现柔性制动的优点。

稳态时的波形见图4,类似于Ping-Bang两点控制,以维持制动电流恒定。

定转子电流的衰减过程见图5,在收到转速信号后,逆变退电流,电气制动完成。可见,以上整个正常停机及制动过程中,直流灭磁开关一直没有跳开,这样大大减轻了直流开关的负担,延长了该开关的使用年限。

4 结论及展望

(1)在电气制动过程中,由于制动时间一般有几分钟,大于电机瞬变过程,定/转子电流在变速情况下保持恒比例关系,但在启动和停止过程中,定转子不再是线性比例关系,此时的详细分析必须按照闭合磁路守恒定理及电机派克方程联合求解。

(2)事实证明,单一投电气制动能够将转速拉到0.5%~1%额定转速点,无须投机械制动可以停机,当然,考虑到机械制动作为电气失效的后备,有必要设计电混制动方式,不定期投风闸制动以检验机械制动好坏。

(下转第174页)

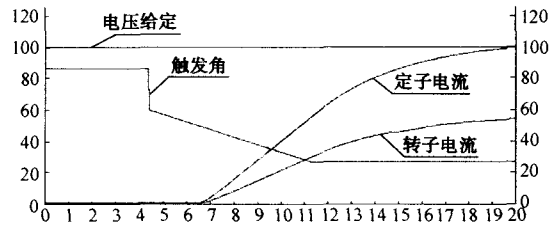


图3 电气制动加励磁试验

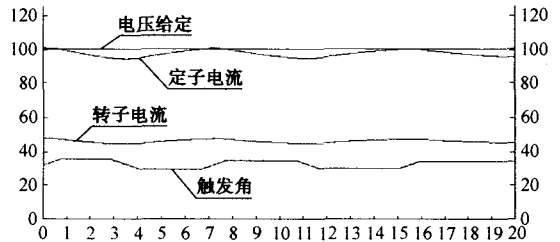


图4 电气制动稳态励磁试验

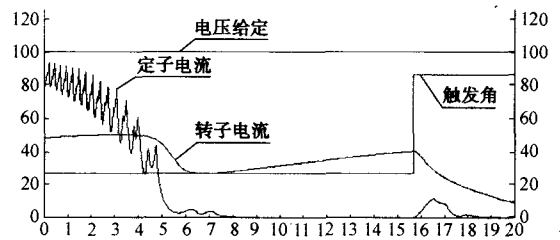


图5 电气制动停励磁试验

更换晶闸管,电压维持约 500 V 运行数小时正常,遂将电压升至约 1 200 V 晶闸管又损坏。打开晶闸管,晶片损坏如图 5、图 6 所示,明显过压击穿。按正常计算过电压也不至于击穿晶闸管,分析原因,一是试验时过压保护措施不完善(除晶闸管阻容保护外交直流侧均无措施),二是试验方式是采用三相自耦变压器升压,串联电感较大,过电压较高。后在直流侧加上过电压保护措施后试验正常。

4 结语

晶闸管损坏的原因很多,但无论哪种原因损坏的晶闸管最终都表现为“击穿”,都会通过较大短路电流,从而使其晶片大面积灼伤,误判为过流损坏,因此当晶闸管损坏后一定要结合各种事故现象和损坏晶闸管仔细分析检查,才能找到晶闸管损坏的真正原因,避免事故重复发生。需说

明的是,本文损坏晶闸管元件照片既有国外厂家的产品,也有国内厂家的产品。晶闸管尺寸有 50 mm, 75 mm, 110 mm, 为了排版方便图片大小都有调整,与实际尺寸是不同的。

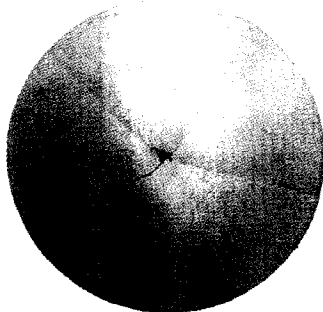


图5 过压击穿的晶闸管

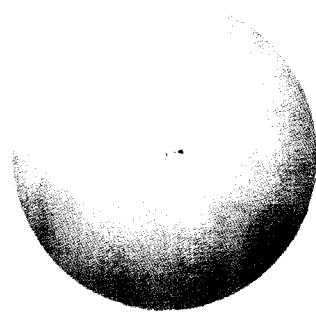


图6 过压击穿的晶闸管

参考文献

- [1] 刘定建、朱丹霞编著. 实用晶闸管电路大全. 同济大学出版社, 1996. 2:3-4.

高劲松 男,高级工程师,主任,长期从事励磁系统维修、管理工作。

(上接第 170 页)

(3)电气制动过程考虑转子定角度控制方式,转子恒励磁电流控制方式,维持定子电流恒定的控制方式都是可行的,其理论基础就是定/转子电流线性比例关系。

(4)制动变压器的设计,必须考虑到失控时,短期定子电流不容许超过定子热容量上限。

(5)对电气制动过程的详细考虑以提高系统的安全可靠性是很有必要的,含软硬件闭锁、冗余、防错、参数设计等等。

(6)精确的仿真电气制动过程及计算制动时间,有助于分析投/退励磁时的定/转子电磁暂态。

展望:电气制动优点十分突出,但也有缺点。第一,当机组内部有电气故障时,电气制动不能投入;第二,机组导水叶漏水过大时,仅仅靠电气制动机组停机过程时间将延长;第三,电气制动装置接线较为复杂,元器件故障或误合误分开关易导致机组事故,提高电气制动的可靠性设计是很有必要的,需要业主、设计院和制造厂等各方协调配合。

参考文献

- [1] 吕宏水,王志明. 水轮发电机组柔性电气制动励磁系统的研制. 水电厂自动化, 1999, (1).
[2] 肖宾,肖洁. 大中型水电机组电气制动选型及设计. 水电厂自动化, 2000, (8).

陈遗志 男,硕士,工程师,主要研究领域为同步发电机励磁控制及设计。

刘国华 男,硕士,高级工程师,主要研究领域为同步发电机励磁控制及设计。

仲 昱 男,硕士研究生,工程师,主要研究领域为同步发电机励磁控制及设计。