

[发电厂]

水轮发电机励磁功率柜电流输出不平衡的分析与处理

文/西安热工研究院有限公司 刘诚威 南江
华能西藏发电有限公司藏木水电站 瞿佳

针对某水轮发电机组励磁系统功率柜直流电流输出不平衡的问题,分析了影响并联运行励磁功率柜均流效果的各种因素,并结合现场实际情况,从晶闸管触发一致性、晶闸管特性和交直流回路阻抗差异等方面着手,进行测试试验,解决励磁系统不均流问题。

目前,国内发电机组普遍采用大功率整流元件整流方式为发电机转子提供励磁电流,通过多功率柜并联运行方式增加励磁系统容量,构成冗余系统,增加励磁系统的可靠性。多功率柜并联运行,就可能出现不同功率单元出力不一致,而引起功率柜的不均流。

某水轮发电机组励磁方式为自并励,励磁系统配置2台整流柜,采用三相全控整流原理,晶闸管采用强触发方式。在试运行过程中,机组有功功率76 MW,无功功率9.2 Mvar时,1#功率柜输出电流400 A,2#功率柜输出电流750 A,两台功率柜输出电流相差较大,功率柜不均流。检查其他工况,不均流现象均存在。

影响功率柜均流的因素

影响自并励发电机励磁功率柜均流的因素包括晶闸管元件的通态特性、开通特性、温度特性及交直流回路阻抗等因素。

1. 晶闸管元件的通态特性因素

晶闸管元件的通态特性是影响各并联支路均流的关键因素,对于两只通态特性不同的晶闸管元件,即使在相同的管压下,其通流能力也不同。在励磁功率柜制造、设计及晶闸管的选择时,应充分考虑晶闸管的通态特性,选用通态特性相同

或相近的元件并联,以减小元件通态特性对均流的影响。

2. 晶闸管元件的开通特性因素

晶闸管元件的开通特性不一致,会引起并联晶闸管开通区间不均流,同时对于两个并联晶闸管,一只导通后,另一只晶闸管两段电压显著下降,开通时间增加,也影响到均流。励磁系统功率柜的晶闸管基本都选择特性参数相同的元件,但每只晶闸管实际的特性难免有差别。现在的发电机励磁调节器采用强脉冲触发方式,陡而强的脉冲采用并联方式送至各功率柜,经过脉冲放大单元放大,触发晶闸管门极,使并联晶闸管开通特性的不平衡降至最小,即使元件个体的开通特性略有差别,也能保证并联支路的晶闸管导通的一致性,从而获得最佳的均流效果。

3. 晶闸管元件的温度特性因素

对于同一晶闸管元件,运行在不同温度时,其通态特性也不同。对于不同并联支路上的晶闸管元件,即使其通态特性完全相同,若运行温度不同,同样会导致不均流。励磁系统中的晶闸管元件通过与散热器压接散热,功率柜中每个晶闸管散热器导热率、散热面积和功率柜冷却风机等均相同,而其压接工艺的差别则与晶闸管散热能力密切相关。在设备运行过程中,由于压接问题

导致晶闸管温度升高的例子时有发生。

4. 交直流回路阻抗因素

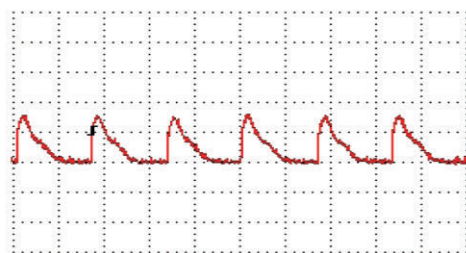
在自并励系统中，各并联支路的晶闸管阳极电压均来自励磁变压器，各并联支路电压相同，交直流回路阻抗将会影响并联支路的电流大小。对于功率柜并联数量较多的励磁系统，可采取从励磁变压器分别辐射电缆到每个功率柜，以减小交流回路阻抗的影响，选择直流侧母排连接方式，以减小直流回路阻抗的影响。在实际工程中，还应注意母线、设备间连接造成的接触电阻，压紧设备连接螺栓，减少接触电阻造成的并联回路阻抗差别。

不均流机组励磁系统的现场检测

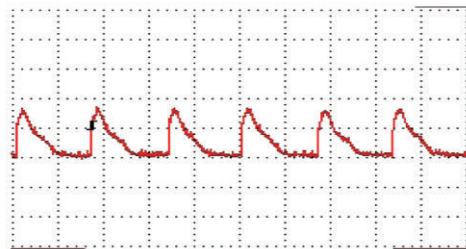
为了检查并确认机组励磁柜不均流的原因，在机组停机后，检查晶闸管整流柜阳极电缆连接及直流侧电流连接，并对主回路中所有螺栓进行反复紧固，以消除两功率柜主回路阻抗差异连接导致的均流效果不佳的可能。

检查各晶闸管元件与散热器压接情况，发现个别螺栓松动，对其进行紧固，消除各晶闸管因散热差异而导致的运行温度对晶闸管特性影响。

检查励磁调节器至功率柜的脉冲回路，包括连接电缆，并重新进行小电流试验，晶闸管输出波形触发一致性良好，可以确定晶闸管功率桥均能被触发，当控制角为 90° 时直流电压波形如图1所示。



(a) 1#功率柜波形图



(b) 2#功率柜波形图

图1 控制角为 90° 时直流电压波形

经以上检查和处理后，重新开机，各工况下功率柜的输出电流无明显改善。为了查找问题，在负载工况下，用示波器测量各功率柜阳极电流波形，如图2所示。从图2中明显可以看出，由于1#、2#功率柜C相电流波形严重畸变，明显不一致，且1#功率柜C相电流在晶闸管导通后减小，2#功率柜C相电流在晶闸管导通后增大，引起输出电流不平衡。可以确定，该机组励磁功率柜不均流问题的主要原因是由并联在C相的两只晶闸管开通特性差异造成的。

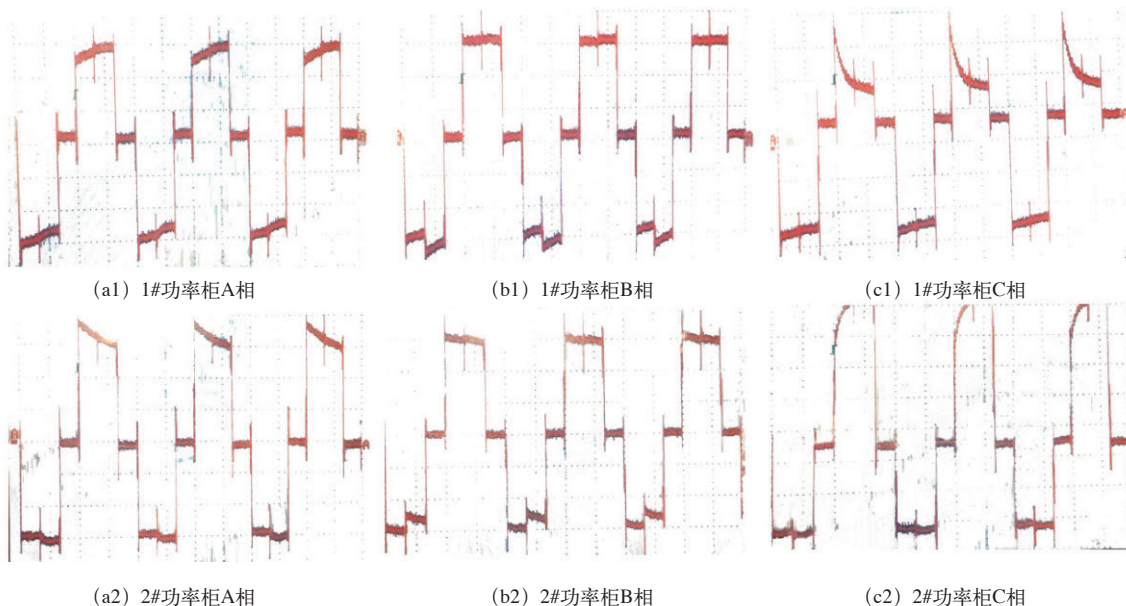


图2 晶闸管阳极电流波形图（不均流）

功率柜不均流原因分析

在稳态时, 晶闸管元件的输出特性影响不同元件之间的电流分配, 图2中C相电流波形畸变与晶闸管元件的输出特性有密切关系。

1. 晶闸管元件输出特性

晶闸管元件的输出特性如图3所示, 可以近似描述为

$$U_{GE} = U_o + rI_c \quad (1)$$

式中, $r = U_{GE}/I_c$ 为通态电阻; U_o 为导通后电流为擎住电流时的晶闸管电压降。



图3 晶闸管输出特性

将晶闸管并联支路的晶闸管简化为两只晶闸管并联, 如图4所示。两只晶闸管输出特性可表示为

$$U_{GE1} = U_{O1} + r_1 I_{C1} \quad (2)$$

$$U_{GE2} = U_{O2} + r_2 I_{C2} \quad (3)$$

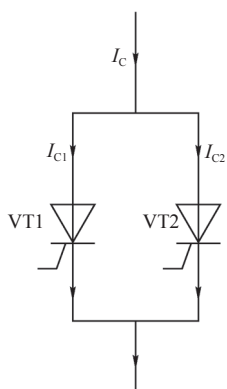


图4 晶闸管并联示意图

对于两只晶闸管并联, 有

$$U_{GE1} = U_{GE2} \quad (4)$$

$$I_c = I_{C1} + I_{C2} \quad (5)$$

因此可以得到VT1和VT2的阳极电流为

$$I_{C1} = (U_{O2} - U_{O1} + r_2 I_c) / (r_1 + r_2) \quad (6)$$

$$I_{C2} = (U_{O1} - U_{O2} + r_1 I_c) / (r_1 + r_2) \quad (7)$$

由于励磁系统均选用同一型号且参数相同的晶闸管元件, 因此 $U_{O1} \approx U_{O2}$, 则式(6)和式(7)可以转换为

$$I_{C1} = r_2 I_c / (r_1 + r_2) \quad (8)$$

$$I_{C2} = r_1 I_c / (r_1 + r_2) \quad (9)$$

可以看出, 两只并联晶闸管的输出电流与其通态电阻关系密切, 晶闸管的通态电阻是影响电流分配不均衡的主要因素。因此, 为了保证并联晶闸管的电流分配平衡, 两个元件应尽可能匹配, 首先应选择通态电压相同的元件并联。

2. 晶闸管阳极电流波形分析

某机组励磁系统采用三相桥式全控整流电路, 原理如图5所示。图5中功率柜1和功率柜2中对应编号的晶闸管元件为并联关系。图2的各波形分别与图5中的晶闸管元件相对应, 以图2a中波形为例作以说明, 电流波形的上半个周期为流过晶闸管VT11的电流, 下半个周期为流过VT14的电流。

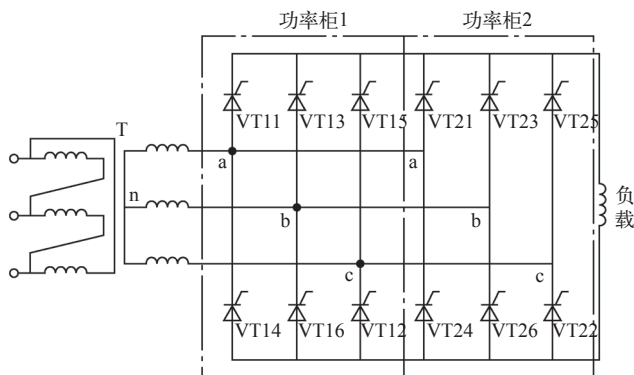


图5 三相桥式全控整流电路原理图

从图2b1和b2可以看出, 两面功率柜的电流波形一致性较好, 说明功率柜中VT13、VT23、VT16和VT26的匹配性较好, 功率柜的不均流问题与它们关系较小。从图2a1和a2可以看出, 两面功率柜的电流的上半波变化不一致, 但不是很明显, 说明功率柜中与A相相关的晶闸管元件不是励磁系统不均流的主要原因。由图2c1和c2可以看出, C相电流波形畸变严重, 这才是造成励磁系统不均流的主要原因。

从图2c1和c2可以看出, 功率柜1的正C相晶闸管VT15在导通后电流迅速下降直至晶闸管关断, 功率柜2正C相晶闸管VT25在导通后电流迅速升高直至晶闸管关断。分析电流波形畸变的原因, 由于晶闸管VT15制造工艺的问题, 致使PN结的载流子复合过程异常, 在其导通后, 通态电阻呈迅速增加趋势, 根据式(8)和式(9)可知, 功率1柜电流减小, 功率2柜电流增大, 与图2c1和c2中反映

的电流波形正好吻合。由于功率柜中晶闸管本身特性差异,影响了并联支路中平均电流的均衡,导致功率柜输出不均流。因此,两台功率柜C相晶闸管特性差异是该励磁系统不均流的直接原因。

处理效果

更换1#功率柜C相正向晶闸管元件VT15,并检查所有晶闸管与散热器的压接,紧固晶闸管固定在散热器之间的螺钉,确保晶闸管与散热器的

接触良好。

经以上检查和处理后,在机组有功功率76 MW,无功功率19 MVar时,1#功率柜输出电流535 A,2#功率柜输出电流560 A,功率柜阳极电流波形如图6所示。从两面功率柜输出电流数据来看,不平衡现象得到明显改善,均流系数满足相关标准要求。根据各相的电流录波图,各并联晶闸管的波形基本一致,两台功率柜C相晶闸管波形不一致现象消失。

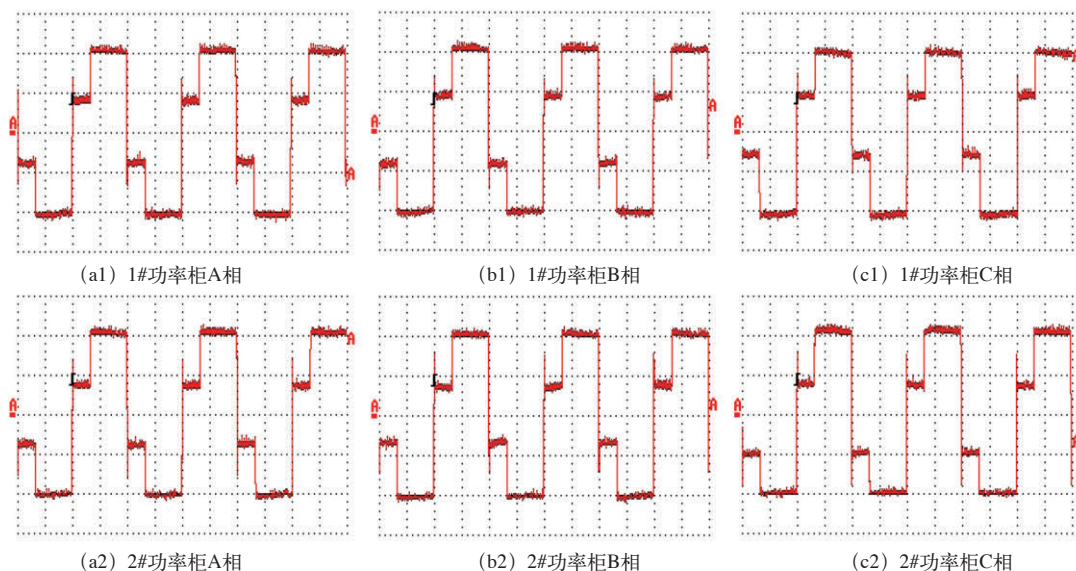


图6 晶闸管阳极电流波形图(均流)

结束语

针对某电厂励磁功率柜输出电流不平衡的情况,总结了引起励磁功率柜不均流的主要因素,从现场检测的角度出发,对晶闸管元件的特性进行分析,结合试验录波图,详细阐述了现场检

查、分析及处理励磁系统不均流问题的过程,以供相关人员参考。EA

(收稿日期:2019.09.19)

(编辑:朱金凤)

MR中国携手上海电力大学展开校企合作

全球变压器控制解决方案领域的领军者MR中国,与上海电力大学展开校企合作,共同推动未来人才发展。双方签订协议,MR中国将连续三年(2020—2022年),向上海电力大学捐赠奖学金,用于奖励该校电气工程学院优秀本科生。此外,MR中国还将为该校推荐的优秀人才提供实践条件,实地汲取当前行业的先进生产经验,开设专题讲座,助力优秀毕业生理论与实践并重,由实践进一步提升技能。

签约仪式上,MR中国总经理Thorsten Stohr(石德)、MR中国人力资源总监沈燕超、上海电力大学电气工程学院党委书记赵玲、院长李东东、上电教育发展基金会秘书长王凡和电气工程学院系主任吴文军等人莅临现场,一同见证此次校企合作育人项目的诞生。

正如MR中国总经理Thorsten Stohr(石德)所述:“未来之路始于今,一个行业的发展必将是由人才驱动。作为聚集百年经验、先进技术及强烈企业社会责任感的公司,我们将持之以恒地助力本土的行业伙伴立德树人,以人才孵化为引擎,驱动能源行业未来发展。”