

浅论同步电机可控硅整流装置的选型

杨卫斌¹，熊杰²，荀国²

(1.昆明电机厂有限责任公司,云南 昆明 650100;2.武汉市陆水自动控制技术有限公司,湖北 赤壁 437302)

摘要:目前,同步电机的励磁系统大多采用可控硅(晶闸管)进行整流,可控硅功率整流回路的设计选型,不仅关系到整流装置本身的安全也关系到发电机乃至电网的安全。从运行角度出发,期望对阳极电压的选择在满足电力系统稳定要求的同时,应兼顾到不至于影响和危及到整流装置安全运行的各种因素。合理的选择强励倍数是整流装置安全、经济、合理运行的重要因素。

关键词:同步电机;可控硅整流器;参数选择;保护措施

中图分类号:TM341;TN342;{U264.3+71}**文献标识码:** B**文章编号:**1001-2184(2019)02-0092-05

1 三相全控桥式整流电路特点分析

典型的三相全控桥整流电路如图 1 所示,由六只可控硅 KG₁~KG₆ 组成,正侧 KG₁、KG₃、

KG₅,负侧 KG₄、KG₆、KG₂,负载为包括有大电感和电阻的同步发电机的转子绕组。

1.1 控制角 $\alpha < 90^\circ$ 情况

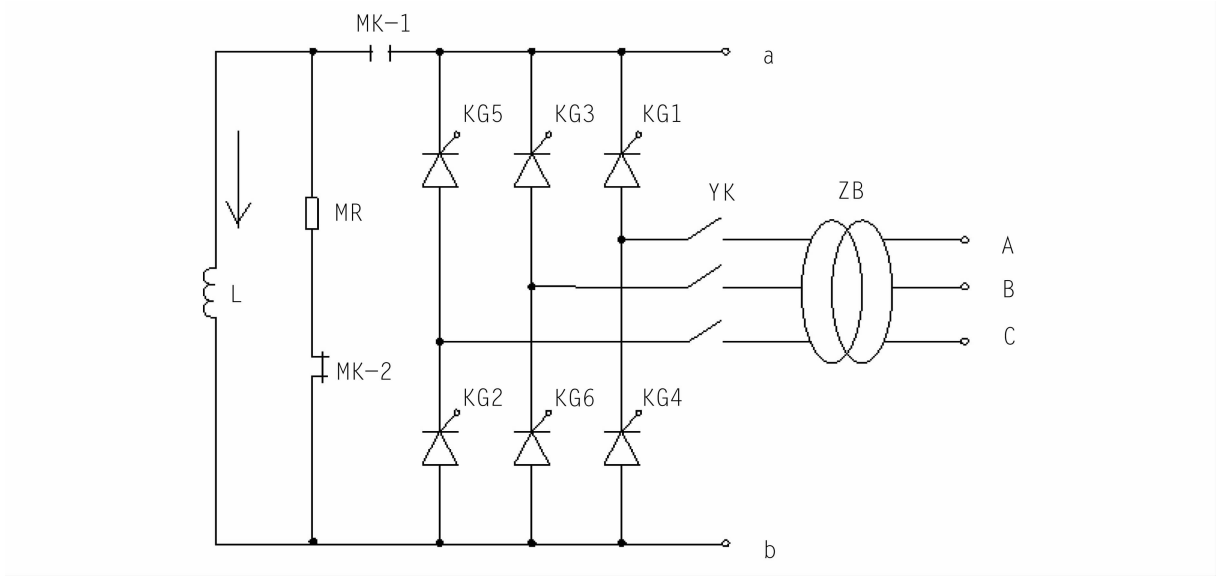


图 1 三相全控整流电路图

当可控硅的控制角 $\alpha < 90^\circ$ 时,三相全控桥式整流电路工作于整流状态时,将三相交流电源通过整流装置转变为直流给励磁供电。当 $\alpha < 60^\circ$ 时,整流输出电压是单相脉动和连续的波形,平均值为正;当 $60^\circ < \alpha < 90^\circ$ 时,由于励磁绕组电感放电的作用,整流输出电压是正负相间、不对称的波形,但正的部分大于负的部分,平均值仍然是正的,仍然向励磁供电。

1.2 控制角 $\alpha > 90^\circ$ 情况

当可控硅的控制角 $\alpha > 90^\circ$ 时,三相全控桥式整流电路工作于逆变状态,将同步电机转子绕组中的储能转化变为交流反馈到系统中。

1.2.1 逆变的条件

同步发电机的励磁绕组具有足够大的电感量,在逆变时,它由原来的负载状态变为电源状态,成为逆变能源,储存在发电机转子中的磁场能依据楞次定律转换为电势能。同步发电机逆变灭

磁需满足如下两个条件:

a. 励磁调节器中的逆变限幅电路给脉冲发生器一个信号,使产生对应逆变角 $90^{\circ}>\beta\geq 30^{\circ}$ 的控制脉冲,三相全控桥的输出电势变为逆变状态的电势,其方向与原整流电势的方向相反。

b. 三相全控桥交流侧要维持有一定电压,以保证整流桥可控硅元件可以轮换导通。

1.2.2 逆变灭磁

在逆变时,同步发电机即进入逆变灭磁状态,励磁绕组中的电感放电电势克服三相全控桥的逆变电势,经可控硅元件反馈到交流侧实现电流衰减的逆变。励磁绕组中的电流方向维持不变而逐渐衰减。由于励磁绕组中的电感放电电势与原来的负载电势方向相反,而电流方向不变,故逆变时的功率对整流状态来说是负功率。因此消耗了发电机励磁绕组中储存的能量,能够达到灭磁的目的。

1.2.3 最小逆变角 β_{min}

可控硅逆变角 $\beta=\pi-\alpha$,控制角加大,则逆变角减小,但逆变角不能太小,否则会造成逆变颠覆(短路)。为了防止颠覆,必须考虑可控硅元件从导通状态变成关断状态所需要的时间角 δ 和换相时换相电抗的影响重叠角 γ ,即能在 $\beta>\gamma+\delta$ 时可靠地输出触发脉冲,根据实际经验和理论分析 β_{min} 一般取 30° 为宜。

1.3 整流桥尖峰过电压的影响

整流桥阳极电压,即励磁变压器的二次额定电压取值越高,在额定状态下整流器将处于控制角 α 值较大的深控状态,由谐波理论可知,当整流器的负载值和可控硅阳极变压器的漏感一定时,可控硅换相时的重叠角 γ 将随控制角 α 的增加而减少,而 γ 角的减小会使谐波电流含量明显增大,由此引起危及整流元件安全运行的尖峰过电压也越高。

2 整流器的参数选择

对于新机组,主要是根据同步电机的额定励磁电压(V_{LN})、额定励磁电流(I_{IN})来选择计算整流器元器件的参数。

2.1 可控硅阳极线电压(U_2)

根据计算公式,整流电压平均值 U_d :

当 $\alpha=0, \gamma=0$ 时,

$$U_{d0}=\frac{3\sqrt{2}}{\pi}E=1.35E, E \text{ 为阳极相电压}$$

负载可控状态下, $\alpha>0$, 时, $\gamma>0$ 时

$$U_d=\frac{3}{2\pi}E[\cos\alpha+\cos(\alpha+\gamma)]$$

实际计算时,考虑 2 倍的强励倍数和损耗,可按下面的经验公式选取:

$$U_2=K'_{LN}, K' \text{ 为经验系数,取值 } 1.5\sim 2.5。$$

2.2 可控硅的反向重复峰值电压 U_{RRM}

可控硅的反向重复峰值电压 U_{RRM} 既要为满足整流元件需承受的反向电压最大峰值,又要保证功率整流器的最大允许电压高于励磁回路直流侧过电压保护装置动作电压整定值:

$$U_{RRM}\geq K''U_2$$

式中 K'' 为电压裕度系数,取值 4.0。

2.3 可控硅通态平均电流 $I_{T(AV)}$ (A)

通态平均电流应满足强励磁工况下的励磁电流。单个桥臂流过的电流平均值:

$$I_{T(AV)}=K_U I_{fN}$$

式中 K_U 为强励倍数,取值 1.6; I_{fN} 为额定励磁电流,单位为安培(A)。

2.4 可控硅的触发脉冲

可控硅三相全控整流桥的触发脉冲可采用双脉冲或宽脉冲两种方式,但要求脉冲的前沿要陡。宽脉冲功耗大,电路简单;双脉冲可大大地降低功耗。为了产生既陡又窄的尖脉冲,通常采用脉冲列触发的方式,可以将宽脉冲调制成脉冲列,也可将双脉冲调制成脉冲列。将双脉冲调制成脉冲列的方式可靠性高,功耗小,见图 2。

3 整流器的保护

励磁整流装置除了给发电机提供磁场外,还有一项重要的任务就是必须保证发电机转子和自身的安全。

3.1 功率整流回路的保护

主回路所设置的保护应考虑两点:(1)对励磁装置自身的安全工作进行保护;(2)对同步电机的励磁绕组进行保护。

3.1.1 防御直流侧和交流侧操作的过电压

当接通整流变压器初级绕组时,由于变压器初级绕组的漏电抗和次级绕组分布电容或抑制电容,组成了一个谐振电路,所产生的谐波分量与可控硅的工作点有关。即:可控硅在开、闭合的瞬间会叠加成阶跃电压,闭合时的阶跃电压,有可能达到正常反峰电压的 2 倍,断开时阶跃电压其峰值

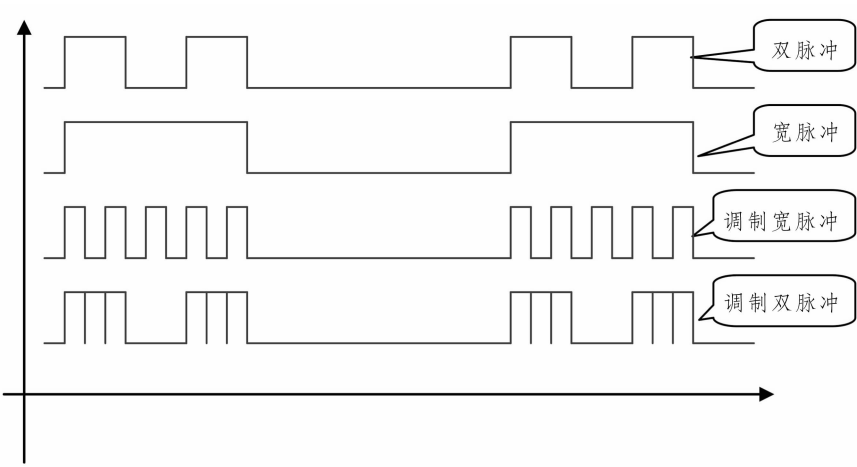


图 2 可控硅触发脉冲波形图

有可能达到正常反峰电压的 8~10 倍,而当直流侧断开时,贮存于交流电路和变压器漏抗中的磁场能量会在开关和整流器两端产生过电压,这些过电压有可能使整流元件损坏,必须采取适当的保护措施。通常采用阻容吸收或非线性电阻吸收方式。

(1)阻容吸收电路,由于电容两端的电压不能突变,利用这一特性可对阶跃电压进行有效吸收,见接线图 3。

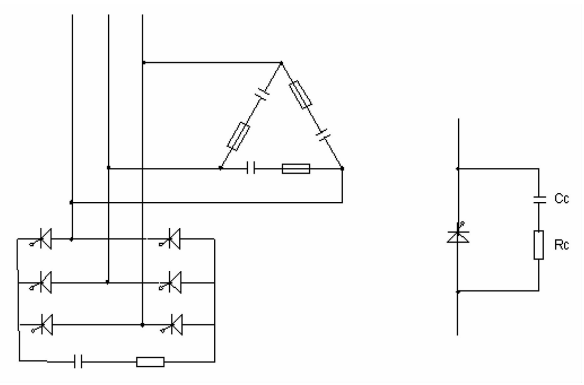


图 3 阻容吸收接线图

(2)交流侧操作过电压保护:

①交流侧吸收电路参数计算:

电容容量 $C(\mu\text{F})$:

$$C=\frac{K_cI_{oi}}{fU_i}$$

电阻阻值 $R(\Omega)$:

$$R=\frac{K_rU_i}{I_{oi}}$$

电阻功率值 $P_r(\text{W})$:

$$P_r=(2\sim3)(K_pI_{oi})^2R$$

式中 U_i 为可控硅阳极空载相电压,单位为伏特(V); I_{oi} 为可控硅阳极空载相电流,单位为安培(A); F 为电源频率,单位为赫兹(Hz); K_c 、 K_r 、 K_p 为计算系数见表 1。

表 1 交流侧过电压 RC 抑制电路计算系数

整流电路类型	K_c	K_r	K_p
三相全控桥式	10 000	0.3	0.25

注:电容额定电压选择,应高于交流侧最高工作电压峰值的 1.1~1.5 倍。

②直流侧吸收电路参数计算:

电容容量 $C_d(\mu\text{F})$;

$$C_d=K_{cd}\frac{I_{oi}}{fU_{oi}}$$

电阻阻值 $R_d(\Omega)$:

$$R_d=K_{rd}\frac{U_{oi}}{I_{oi}}$$

电阻功率 $P_{rd}(\text{W})$:

$$P_{rd}=(2\sim3)I_{cd}^2R_d$$

$$I_{cd}=\frac{K_cV_{do}}{\sqrt{2}\times Z_d}$$

$$Z_d=\sqrt{R_d^2+(\frac{1}{2\pi f'C_d\times 10^{-6}})^2}$$

式中 U_{oi} 为可控硅阳极空载相电压,单位为伏特(V); I_{oi} 为可控硅阳极空载相电流,单位为安培(A); f' 为整流桥最低脉动频率,单位为赫兹(Hz),取 $6f$, f 为电源频率,单位为赫兹(Hz); V_{do} 为控制角为零时,空载整流电压平均值,单位为伏特(V),可取 $1.35U_i$, U_i 为可控硅阳极线电压,单位为伏特(V); K_{cd} 、 K_{rd} 、 K_c 为计算系数见表 2。

表 2 直流侧过电压 RC 抑制电路计算系数

整流电路类型	K_{cd}	K_{rd}	K_c
三相全控桥式	$70\,000\sqrt{3}$	$0.1\sqrt{3}$	0.057

注:电容额定电压选择,应高于直流侧最高工作电压的 1.1~1.5 倍,当选用直流电容时,电容电压应高于直流侧最高工作电压的 3~5 倍;在实际选型时,电阻功率 Pr_d 应大于计算值 5~10 倍。

3.1.2 浪涌吸收器保护回路参数计算

氧化锌非线性电阻阈值电压 U_{1mA} (V):

$$90\%U_{1mA} \geq \sqrt{2}U(1+K_B)$$

式中 K_B 为电网电压上升系数,取 0.05~0.1; U 为回路工作电压有效值,单位为伏特(V)。

氧化锌非线性电阻阈值电压 U_{1mA} 应小于晶闸管 U_{RRM} 。

3.1.3 晶闸管换相过电压并联阻容保护回路参数计算

(1)主要包括电容和电阻的选型

①电容选型

电容容量 C_c (μF):

$$C_c = (2.5 \sim 5) I_{T(AV)} \times 10^{-3}$$

电容额定电压 U_c (V):

$$U_c = (1.1 \sim 1.5) U_{RRM}$$

式中 $I_{T(AV)}$ 为晶闸管通态平均电流,单位为安培(A); U_{RRM} 为晶闸管反向重复峰值电压,单位为伏特(V);

电容容量根据经验,可按表 3 选取。

表 3 电容容量选取表

晶闸管通态 平均电流 /A	1 000	500	300	200	100	20
电容器容量 / μF	2	1.0	0.5	0.25	0.15	0.1

②电阻选型

电阻阻值 R_c (Ω):

$$R_c \leq (1 \sim 3) \sqrt{\frac{L_k}{C_c}}$$

电阻功率 P_{rc} (W):

$$P_{rc} \geq 5 \times (U_{RRM} \times 2\pi f C_c)^2 \times 10^{-12} \times R_c$$

式中 R_c 通常在 10~40 欧之间选取; L_k 为励磁变压器漏电感,单位为毫亨(μH); U_{RRM} 为晶闸管反向重复峰值电压,单位为伏特(V)。

该式表明,可控硅在换相过程中所产生的能量须由与整流元件并联的 R—C 阻容缓冲器旁路并予以吸收,而这个能量与 U_{RRM} 有关,而 U_{RRM} 是根据额定励磁电压和励磁的强力倍数来选的,即,阻容吸收的换相磁场能量与外加电压的平方成正

比,并且存储与吸收能量之间应达到平衡并有一定的吸收容量储备,否则将导致吸收换相能量的阻容元件被烧毁,进而引起整流桥相间短路。

3.1.4 可控硅跨接器+非线性电阻吸收

对于能量较大的过电压,可采用在转子两端并联可控硅跨接器加非线性电阻的方式来吸收,见图 4。

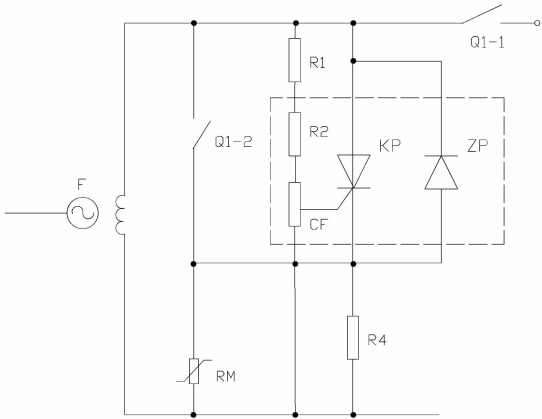


图 4 可控硅跨接器非线性保护+灭磁原理图

该接线既能实现保护功能,又能实现灭磁功能,而且是双向的。发电机在运行状态下, Q_{1-2} 是闭合的,如果出现过电压则 RM 动作,起到保护转子的作用。当需要灭磁或 Q_{1-2} 断开, Q_{1-1} 闭合,则正向过电压时,KP 导通,通过 RM 实现保护,反向过电压时,RM 与 ZP 导通,实现保护功能。

3.2 冷却设备

在目前中小型机组的的整流励磁设备中,硅元件的冷却方式有自然冷却、风冷和热管冷却等方式,以风冷和自然冷却为主。由于目前国产三相风机的噪音较大,可改用单相风机,单相风机的性能好、寿命长、噪音小(一般都低于 60 分贝)、价格低。我国相关标准要求整流器柜风机的噪音,在距柜 1 米处不大于 70 分贝;热管冷却方式由于体积小、噪音低、热传导效率高,已开始实际运用,但目前的制作加工水平不很稳定,如果出现慢性漏氟,也无法检测,时间长了很有可能损坏整流元件,同时也不利于环保。

4 结 论

同步电机励磁系统中,可控硅整流装置的参数选择不仅要合理的选择可控硅元件的参数,也要合理地配置和选择保护电路及保护元件的参

数。了解三相全控整流电路的原理和特点是合理选择元件参数的基础。

按本文推荐的计算公式可知,整流装置的强励倍数与整流元件的参数选择和保护电路的参数选择有很大关系。励磁的强力倍数越高,额定运行情况下可控硅的控制角 α 就越大,可控硅整流时产生谐波能量和换相过电压也越高,对保护的要求也越高,整体安全性降低。

从运行角度出发,期望对阳极电压的选择在满足电力系统稳定要求的同时,应兼顾到不至于影响和危及到整流装置安全运行的各种因素。合理的选择强励倍数是整流装置安全、经济、合理运

(上接第 82 页)

在土工膜焊接过程中,现场监理应全过程旁站,对焊接存在的问题及时处理。焊接前应对主膜检查,确保主膜无裂口、针眼,焊接完成后严格检查焊接接头。焊接接头检查采取往焊缝内注入颜色鲜明无腐蚀性的液体进行检测,用手挤压后无渗无漏可判定焊缝质量合格。

5.3.2 土工膜保护

土工膜周边主要靠 1 m 的天然砂进行保护,砂的质量好坏直接影响土工膜的防渗效果,必须从严控制保护用砂的质量。砂不能混有粗骨料,特别是有尖角的粗骨料,在控制料源的基础上,施工单位要组织专班、专人进行现场挑检。

5.4 管理控制

5.4.1 料源检测

施工单位须安排专职人员进行料源检测、现场指挥,质检、安全人员须佩戴袖章上岗,严格按照相关技术要求进行围堰填筑,对违规现象予以重罚;并对交通安全隐患进行梳理,逐一予以解决。

5.4.2 围堰填筑现场监管

业主、监理单位须对围堰填筑现场实施严格监管,对重点质量控制点进行全过程监控。监理部按全程监控配置人员,项目部人员早、中、晚三次现场巡视检查。对相关人员进行了责任心教育,并进行

行的重要因素。

参考文献:

[1] GB/T 10585—89,中小型同步电机励磁系统基本技术要求[S].
[2] NB/T 42126—2017,小水电机组通用技术条件[S].
[3] 陆继明、毛承雄等,同步发电机微机励磁控制[M]. 中国电力出版社 2006 年 1 月出版

作者简介:

杨卫斌(1967-),男,云南昆明人,工程师,主要从事水电机组的自动控制和研究工作;
熊 杰(1956-),男,湖北武汉人,教授级工程师,主要从事水电站的自动控制研究工作;
苟 国(1967-),男,湖北赤壁人,高级工程师,主要从事水电站的自动控制工作.

(责任编辑:卓政昌)

培训;对发现的问题,要求及时制止纠正。

6 围堰拆除

围堰总拆除工程量约 24.43 万 m³,分为水上和水下两部分开挖。水上部分采用 1.6 m³ 反铲自上而下分层开挖,水下部分采用长臂反铲自右向左端退法开挖,利用上游下基坑道路进行出渣。

7 结 语

在围堰整个施工过程中,影响施工质量的因素很多,要想交出满意的答卷,各参建单位须要做到层层把关。首先,施工单位要提高对现场安全质量体系的重视程度,严格落实三检制度,对作业人员进行技术交底。其次,监理单位要加强监管力度,加强责任心,对重点质量控制点要进行有效控制。同时,业主还要加强巡查,对施工过程中发现的问题要及时处理。

参考文献:

[1] SL303—2004,水利水电工程施工组织设计规范[S].北京:中国水利水电出版,2004.
[2] DL/T5395—2007,碾压式土石坝设计规范[S].北京:电力出版社,2008.

作者简介:

周 敏(1982-),男,安徽巢湖人,工程师,硕士,现供职于中国三峡建设管理有限公司,从事水利水电项目管理工作.

(责任编辑:卓政昌)

浙江首个海上风电场项目全部并网发电

3 月 29 日,由中国电建子企业华东院承担勘测设计监理的国电普陀 6 号海上风电场,作为"浙江省首个海上风电项目"全部并网发电。该项目总装机容量为 252 MW,布置 63 台 4.0 MW 风电机组。

(北极星电力网 2019 年 4 月 3 日)