

同步发电机转子过电压及其保护

宣自平

(合肥赛凯科电气, 安徽 合肥 230031)

[摘要] 本文分析探讨了同步发电机转子回路过电压的来源及其保护措施, 并以三峡巨型水轮发电机为例, 设计了一套较完整的保护方案, 以供参考。

[关键词] 发电机 转子 过电压 保护

1 同步发电机转子过电压的来源

同步发电机转子回路的过电压主要有以下几种:

1.1 可控硅整流桥产生的换相过电压^[1]

可控硅三相全控整流桥的原理图如图 1 所示, 其整流输出的直流电压 U_f 波形如图 2 所示 (电源频率 50Hz)。图 1 中励磁变压器 LB 次级相电势分别为 u_a 、 u_b 、 u_c , LB 的漏感以及线路电感折合到次级绕组用集中电感 L_b 表示。正常运行时 K1~K6 六只管子轮流导通。

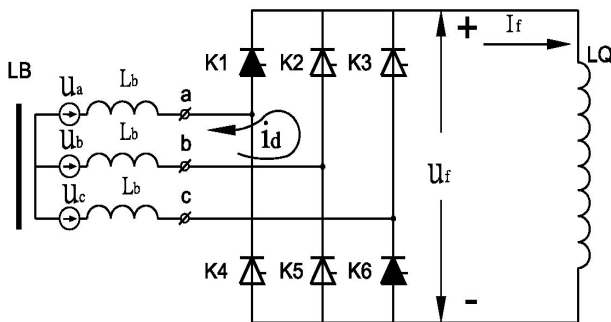


图 1 可控硅全控桥整流原理图

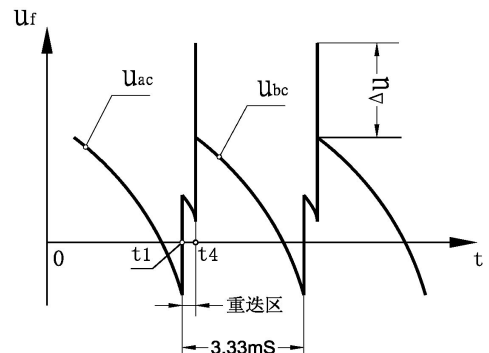


图 2 励磁电压波形图

假定在 t_1 时刻前, K1 和 K6 导通; 在 t_1 时刻 K2 管子收到触发脉冲, 此时交流阳极电压 (相电压) $u_b > u_a$, 故 K2 管承受正向电压, K1 管承受反向电压, 换流趋势是 K2 管导通, K1 管截止。但是由于 K1 管在导通期间晶体内存积了大量的少数载流子 (电子和空穴), 不能立即恢复截止, 这样在短时间内 K1 和 K2 同时导通, 称为重迭区。此时 a、b 两相间产生瞬时的短路, 短路电流 i_d 增长速度受 $(u_b - u_a)$ 电压差及回路电感 L_b 的控制, $di_d/dt = (u_b - u_a) / 2L_b$ 。短路期间整流输出电压的瞬时值 $u_f = (u_{ac} + u_{bc}) / 2$, 为 a、b 两相对 c 相线电压的平均值 (考虑励磁变 LB 次级 a、b 两相的短路阻抗压降相同)。K1、K2 两硅管电流的波形见图 3。 t_1 时刻前 K1 管电流 i_{K1} 等于励磁电流 I_f , K2 管电流 i_{K2} 为零; t_1 时刻 K2 管触发导通, 其电流 i_{K2} 上升, 同时 i_{K1} 下降, 开始换流过程。由于发电机励

磁绕组 LQ 大电感的影响，励磁电流 I_f 可视作恒值。根据柯希霍夫节点定律， $i_{K1} + i_{K2} = I_f = \text{恒值}$ 。换流的快慢即 i_{K1} 及 i_{K2} 的变化率（同时也是短路电流 i_d 的增长率）决定于 $(u_b - u_a)$ 的电压差及回路电感 L_b 的影响， $di_k/dt = (u_b - u_a)/2L_b$ 。到 t_2 时刻 i_{K1} 降到零， $i_{K2} = I_f$ ，似乎换流可以结束了。但此时 K1 内还积存有大量的少数载流子，不能恢复截止，故短路电流 i_d 继续增长， i_{K1} 变为负值， $i_{K2} > I_f$ 。到 t_3 时刻 K1 反向电流达到最大值，积存的少数载流子迅速复合完毕，立即恢复截止，故 K1 反向电流立即回零，K2 的正向电流也产生一个“猛跌”回到 I_f （据实验观察， $t_3 \sim t_4$ 仅几个 μs ）。硅管电流 i_{k1} 和 i_{k2} 同时也是电感 L_b 内的电流，由于 $t_3 \sim t_4$ 此电流变化率极大，故在电感 L_b 中感应出极高的换相过电压 $\Delta u = -L_b \frac{di_k}{dt}$ 。据了解，如不采取适当措施， Δu 可达到阳极电压峰值的 2~4 倍。

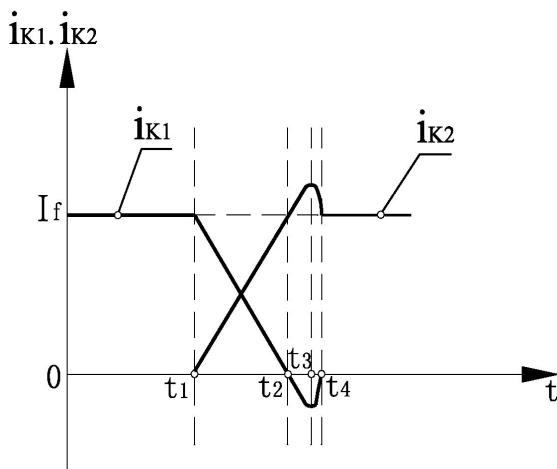


图 3 K1、K2 硅管电流波形图

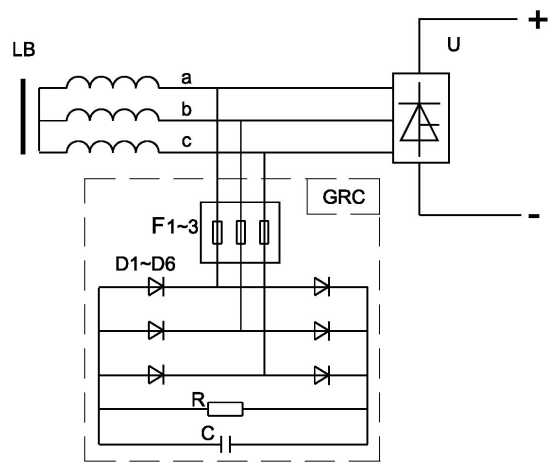


图 4 GRC 保护原理图

1.2 定子侧或转子侧开关通断产生的操作过电压

定子出口开关非同期并网，或突然甩负荷跳闸，使定子电流发生阶跃突变，发电机气隙及铁心中磁通急剧变化，在交链的转子励磁绕组 LQ 中感应出过电压。由于励磁绕组的串联匝数较定子绕组多，好象变压器的升压绕组，故过电压幅值较高。

转子侧的灭磁开关跳闸灭磁，使励磁电流快速下降，也会在励磁绕组 LQ 的电感及励磁变 LB 漏感中感应出较高的过电压。

1.3 定子出线短路或遭雷击等产生故障过电压

定子出线短路、接地，或遭雷击等事故时，定子侧产生各种故障过电压，这些过电压会经过定子绕组及转子励磁绕组 LQ 间的耦合，或者励磁变压器初级与次级间的耦合，感应到转子回路里来。

1.4 发电机异步运行时产生滑差过电压

同步发电机在运行中失磁，会使转子在高于同步转速下异步运转，靠阻尼

绕组的作用变成异步发电机。在有功负荷突然变化时，功率角发生突然变化或发生失步振荡的过程中，也有暂时的异步运行。这时转子励磁绕组 LQ 的导体与定子电流产生的旋转磁场间有相对运动，导体切割磁力线产生感应过电压，此过电压是一个正弦波，其幅值

$$E_{hm} = \sqrt{2} \times 4.44 f_2 w \Phi k_w \quad (1)$$

式中： f_2 — 异步运行时转子滑差感应电压的电频率，一般为几到十几个 Hz，

w — LQ 的串联匝数，

Φ — 定子电流产生旋转磁场的主磁通，

k_w — LQ 的绕组系数。

由于 LQ 的匝数 w 较多，故 E_{hm} 较大，据有关资料^[2]介绍，水轮发电机可达几万伏。

1.5 定子三相负载不对称（或非全相）运行时产生不对称过电压

发电机定子三相负载不对称或一相断路（非全相）运行时，定子三相电流不对称。根据《电机学》^[3]中“对称分量法”的分析，一组不对称的三相电流，可以分解成三组对称的三相电流，分别为“正序分量”、“负序分量”及“零序分量”。这三组对称的电流流过发电机定子三相在空间相隔 120° 电角度的绕组，将分别产生各自的磁场。由矢量分析可知，零序电流产生的合成磁场为零。而正序及负序电流产生的合成磁场分别在空间作正向及反向的同步转速旋转，称作正序及负序磁通。而转子绕组 LQ 是以正向同步转速旋转的，它与正序磁通相对静止而与负序磁通以两倍同步转速相对运动。该过电压的幅值可用（1）式计算，不过式中的 $f_2=100\text{Hz}$ ， Φ 为定子不对称电流产生的负序磁通。

2 转子过电压保护

我们经过十几年的研究与实践，对上述 5 种过电压均已有较成熟的保护措施，现分述如下：

2.1 对上述第一种换相过电压，由于其产生的频率高达 300Hz，又是长期连续的，用 ZnO 压敏电阻来吸收效果不好。因为 ZnO 要求长期的荷电率限制在 0.6 以下^[8]，即意味着不能频繁而连续地导通吸能，否则容易老化，漏电流上升，寿命缩短。所以国内有些单位应用 ZnO 作尖峰吸收器时，都把 ZnO 的压敏电压取得很高，以降低荷电率，这仅仅为了保护 ZnO 自身安全，对设备保护作用不佳，形同虚设。

我公司参考进口 ABB 公司的电路，与东方电机厂合作研制成 GRC 型阻容吸收过压保护器，专门用于吸收可控硅的换相过电压，在四川宝珠寺 200MW 水轮发电机上反复试验，限压性能良好。经过 100 多台发电机使用的结果证明，本保护器可将换相过电压限制到阳极电压峰值的 1.5 倍以下。

根据上述 1.1 条关于换相过电压产生的原因分析，可见其产生的“源头”在励磁变的漏感及线路电感，所以“从头拦截”比较好，我们把 GRC 放在整流桥

的交流侧，如图 4 所示。如有多台整流柜并联运行，建议在总交流进线处集中设一组 GRC 即可。因换相过电压的产生只决定于并联桥臂中最后截止的那只可控硅，与并联桥臂的多少无关。在可控硅换相 $t_3 \sim t_4$ 阶段，LB 次级绕组任意二相电流突变产生过电压时，都可以经过二极管 $D_1 \sim D_6$ 对电容 C 充电，从而得到缓冲，降低了 di/dt ，限制了过电压。 t_4 时刻后，C 上的电荷向电阻 R 释放，等待下一个周期再次吸收。

二极管 $D_1 \sim D_6$ 的作用一是可使三相共用一组 R、C，节省体积大、价格高的高压电容；二是防止 C 上的电荷向励磁回路释放，避免在可控硅换相重迭瞬间二相短路时 C 突然放电产生极大的 di/dt ，损坏可控硅管；三是可以避免电容 C 和回路电感产生振荡。

2.2 上述第 2 至 5 四种过电压，均不是长期连续而只是偶然发生的，非常适合用 ZnO 压敏电阻来保护。主要是 ZnO 有优良的非线性伏安特性（见图 5），一方面在大电流冲击下残压不高，保护特性好；二是在过电压消失后，ZnO 的续流迅速大幅度下降到 mA 级，可使过电压保护跨接器中的可控硅管自行关断。而进口的跨接器用 SiC 作吸能元件，其漏电流大，过电压保护动作后不能自行关断，必须停机复归，或用“熄灭线”、“瞬时逆变”等复杂的操作来复归，降低可靠性。故很多进口的 SiC 跨接器均由我所改成 ZnO 跨接器（如葛洲坝、龙羊峡等电站），方能在国内顺利使用。

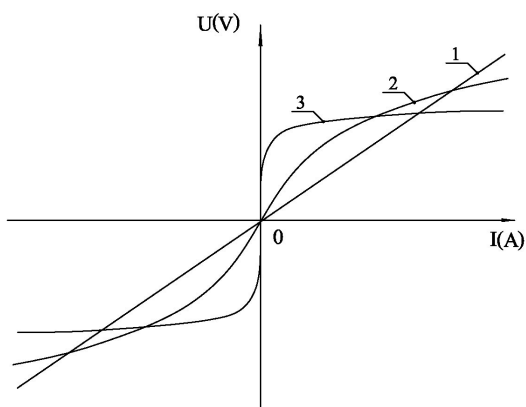


图 5 三种电阻的伏安特性曲线图
1. 线性电阻 2. SiC 电阻 3. ZnO 电阻

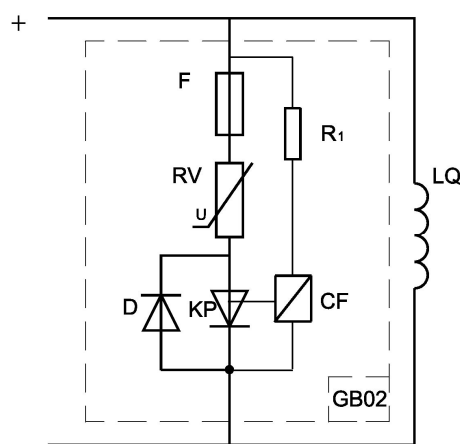


图 6 GB02 型过电压保护器

图 6 是 GB02 型 ZnO 过电压保护跨接器，现已普遍推广使用到千余台发电机，其工作原理如下：

正常运行时 KP 不通，正向励磁电压被 KP 阻隔，反向虽然有二极管 D 导通，但励磁电压反向峰值很低，所以 ZnO 电阻 RV 承受电压不高，荷电率很低，可保证其长期工作寿命，不易老化。正向过电压袭来时，通过分压电阻 R_1 使触发器 CF 动作，输出触发脉冲使 KP 触发导通，RV 立即接入转子回路导通吸能限压；过电压消失后，RV 的续流即下降到 mA 级，小于 KP 的维持电流，KP 自行截止，跨接器复归关断。反向过电压由二极管 D 导通限压，同样自动恢复截

止。正向过电压保护动作电压值可以通过改变 R_1 的阻值来整定，调整方便。

如励磁电压峰值不高(如用直流励磁机或交流励磁机不可控整流励磁)，ZnO 直接跨接的荷电率 < 0.6 时，可用 GB01 直跨型保护器(见图 7)，比较简单可靠。

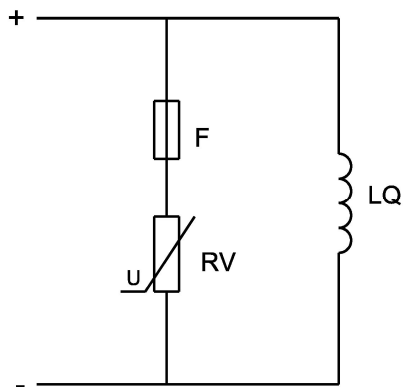


图 7 GB01 型过电压保护器

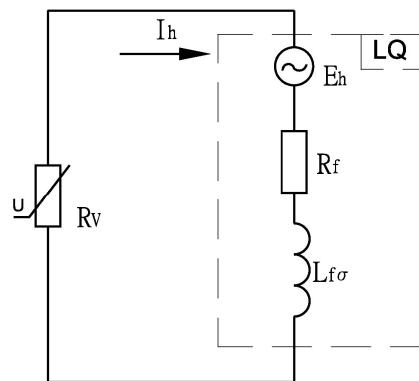


图 8 异步运行时转子绕组等值电路

2.3 过电压保护的吸能容量

2.3.1 上述第 1~3 种过电压持续时间都在毫秒级以下，所以能量都不大。第 4~5 种持续时间较长，能量较大。

2.3.2 发生滑差过电压时，感应电势幅值 E_{hm} 如(1)式所示，由于 Φ 及 w 均较大，故其值相当可观(据有关资料^[2]，水轮发电机可达几万伏)。如 LQ 外电路开路(如可控硅整流桥反向不通，也相当开路)，则 LQ 的端电压就等于 E_{hm} ，势必击穿绝缘或可控硅管。如在 LQ 两端跨接 ZnO 电阻，则其电压被限制。这时励磁绕组的等值电路图如图 8 所示。图中 E_h 为滑差感应电势，有效值 $E_h = 4.44f_2w\Phi K_w$ ， R_f 是 LQ 的内电阻， $L_{f\sigma}$ 是 LQ 的漏电感， R_v 是外接的 ZnO 压敏电阻的等效静态电阻值(随电流大小而变，电流大时阻值小)。则回路电流有效值 $I_h = E_h / \sqrt{X_{f\sigma}^2 + (R_f + R_v)^2}$ 。式中 $X_{f\sigma} = 2\pi f_2 L_{f\sigma}$ ，是 LQ 的漏电抗。在 $f_2 \geq 5$ 时， $X_{f\sigma}^2 \gg (R_f + R_v)^2$ ，故可忽略电阻^[4]， $I_h = E_h / X_{f\sigma} = 4.44f_2w\Phi K_w / 2\pi f_2 L_{f\sigma} = 2.22 w\Phi K_w / \pi L_{f\sigma}$ 。由于分子、分母中转子滑差电频率 f_2 消掉， w 、 K_w 及 $L_{f\sigma}$ 均是发电机的固有参数， Φ 决定于定子并网的电压及电机参数等，也基本为固定值，所以最后得出 I_h 近似为恒值，与滑差频率无关。即异步运行时的转子励磁绕组 LQ 可近似视作一个恒流源(如 $f_2 < 5$ ，由于 E_h 及 $X_{f\sigma}$ 均减小，电阻相对变大不可忽略，故 I_h 减小，更趋安全)。

$$\text{ZnO 电阻 RV 吸收的能量 } W = \int_0^T uidt \quad ,$$

式中： u — ZnO 两端电压瞬时值(V)

i — ZnO 内流通的电流瞬时值(A)

t — 时间(变量，s)

T — 异步运行工况持续时间(s)

由于 ZnO 导通时伏安特性平坦, 因 $u \approx \bar{U}$ (平均残压) = 恒值, 可提到积分外面:

$$W = \bar{U} \int_0^T idt = \bar{U} \bar{I} T \quad (2)$$

式中 $\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T idt$ 为电流平均值, $\bar{I} \approx I_h \times \sqrt{2} \times \frac{2}{\pi}$ 。

式(2)中 \bar{U} 由 ZnO 选择的残压决定, 一般为 1~3 千伏; \bar{I} 由发电机参数决定, 一般为几千安, 经验数据可取 $\bar{I} = (0.7 \sim 0.8) I_{fN}$ (额定励磁电流); T 决定于发电机失磁保护的動作时间^[5](从发生失磁开始到定子出口开关跳闸的时间), 一般为 125ms; 由此可算出 W 的大小。一般发电机的灭磁能容量均远大于滑差过电压的能量。我们设计的发电机转子快速灭磁兼过电压保护装置中, 灭磁及过电压保护所用的吸能限压 ZnO 元件是公用的, 所以只要灭磁能容量满足了, 则过电压保护自然能满足, 不必作过份仔细的计算。

2.3.3 不对称过电压能量的理论计算方法与上述第 2.3.2 节相似, 由于 I_h 的值基本与滑差频率无关, 不对称运行的负序磁通 Φ -比异步运行时的正序磁通小 (最严重的缺相运行时为 1/3), 故不对称过电压的电流小于滑差过电压, 而不对称工况的持续时间亦决定于继电保护的動作时间。由于许多原始数据不确切, 故要精确计算 W 的数值有一定困难。但由经验估计的大致数值范围告诉我们, 该过电压保护的吸能容量小于滑差过电压, 同样不会超过灭磁装置的吸能容量。如果过电压保护的吸能限压 ZnO 元件是与灭磁兼用的, 则只要灭磁能容量满足了, 过电压能量也自然满足。

2.3.4 以上两节的分析均是在发电机继电保护正常动作的情况下, 用较短的时间切除异步运行及非全相工况。但是在人员误操作或设备不健全的情况下, 也可能出现超长时间的异步运行或非全相工况, 如岩滩、古田溪、富水等水电站, 均出现过上述情况。由电网通过定子侧向转子回路过电压保护元件源源不断地输入能量, 最后 ZnO 的吸能超过了极限, 将过热烧毁。但由于其限压作用, 保证了发电机转子绕组不受损害, 属“丢卒保帅”。

2.3.5 上述 2.3.2~2.3.4 节的分析均是对水轮发电机而言。汽轮发电机由于其转子整锻铁心中可产生强烈的涡流阻尼作用, 削弱了旋转磁场的感应电势, 故其滑差过电压及不对称过电压幅值不高^{[2][6]}, 根据经验该幅值 $U_{hm} < (3.5 \sim 4) U_{fN}$ (额定励磁电压), 对转子绝缘及励磁回路元件不致造成危害, 故汽轮发电机允许较长时间 (可达 15 分钟) 的异步运行而不跳闸^[6]。相应的中国电力行业标准 DL/T 650-1998^[7]中, 5.5.5 条规定“(汽轮) 发电机转子过电压保护……动作电压值应高于……异步运行时的过电压值”, 这里是采取“躲”的方式, 而水轮发电机不允许异步运行, 采用“限”和“切”的方式, 两者有本质的区别。总之, 汽轮机转子过电压保护只要其动作电压值定得足够高 (大于 3.5~4 倍 U_{fN}), 就能躲过异步滑差和不对称过电压, 不必考虑这二项的吸能容量。

3 三峡发电机转子过电压保护设计方案

以下以三峡巨型水轮发电机（ABB 公司配套）为例，设计一套完整的转子回路过电压保护方案，以供参考。

3.1 原始数据

由长江水利委员会提供的三峡 ABB 水轮发电机有关技术参数如下：

序号	参数名称	符号	数值	单位	备注
1	发电机额定容量	P_N	777.8	MVA	
2	额定励磁电压	U_{FN}	475.9	V	
3	额定励磁电流	I_{FN}	4158	A	
4	励磁变容量	S_N	3×2925	KVA	
5	励磁变二次线电压 (阳极电压)	U_{2N}	1243	V	
6	励磁变短路阻抗	U_K	8	%	
7	整流柜晶闸管断态 重复峰值电压	V_{DRM}	5000	V	
8	晶闸管平均通态电流	I_T	2520	A	
9	晶闸管反向恢复 峰值电流	I_{RM}	350	A	正向电流 $I_{TM}=2000A$ 时

励磁方式为机端自并励，三相全控桥式整流。

3.2 原理电路图

保护方案采用本公司 MB62 型发电机快速灭磁兼过电压保护装置，并在励磁交流侧设置 GRC 型阻容吸收过电压保护器，原理电路如图 9 所示。

图中在直流侧设置了两套 GB02 型过压保护器，转子侧的 RV1 用以吸收运行中转子回路的各种过电压，兼作快速灭磁的吸能元件，配合移能型磁场断路器 DMK1~2，达到快速移能灭磁的功效。电源侧的 RV2 正常运行中不起作用，因为运行时 DMK 合上，RV2 和 RV1 两组过压保护并联，设计取 RV1 的动作电压和残压低，吸能容量大，故过电压均由 RV1 吸收。在灭磁过程中，DMK 跳闸，RV2 和 RV1 分开，分别吸收励磁变压器漏感及转子绕组的磁能。互感器 CT1 和 CT2 分别采集 RV1 和 RV2 动作的电流作过电压动作信号。交流侧设置一组 GRC，主要吸收可控硅换相尖峰过电压。

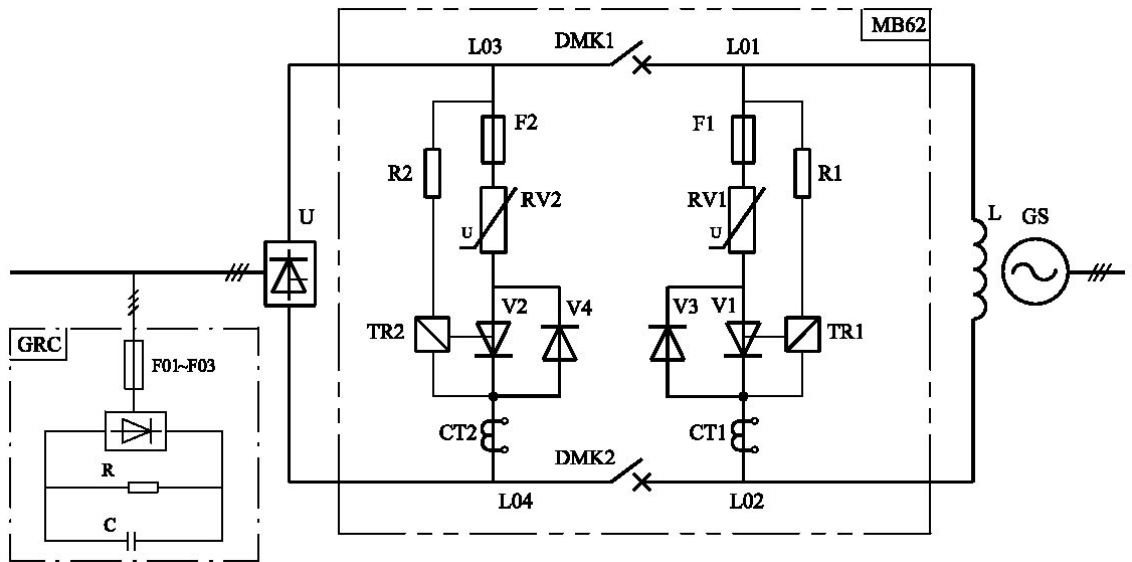


图 9 三峡发电机灭磁及过电压保护设计方案原理电路图

3.3 主要元件参数和整定值的计算选择

3.3.1 转子侧过电压保护 RV1

3.3.1.1 残压 U_{res1}

a) 根据中国电力行业标准 DL/T 583-1995《大中型水轮发电机静止整流励磁系统及装置技术条件》^[8]（以下简称“标准”）4.5.2 a)，“灭磁过程中，励磁绕组反向电压一般不低于出厂试验时励磁绕组对地试验电压幅值的 30%，不高于 50%”。故 $U_{res1} = (0.3 \sim 0.5) \times 10U_{FN} \times \sqrt{2} = (0.3 \sim 0.5) \times 10 \times 475.9 \times \sqrt{2} = 2019 \sim 3365V$ 。

b) 根据“标准”4.4.4 b)，“过压保护动作电压最高瞬时值应低于功率整流桥的最大允许电压，且最大不得超过出厂试验时励磁绕组对地耐压试验电压幅值的 70%”。故 $U_{res1} < U_{DRM} = 5000V$ ，同时 $U_{res1} < 0.7 \times 10U_{FN} \times \sqrt{2} = 0.7 \times 10 \times 475.9 \times \sqrt{2} = 4711V$ 。

c) 根据以上计算，再考虑满足磁场断路器 DMK 换流弧压的要求（从略），以及足够的裕量，选择 $U_{res1} = 2100V$ 。

3.3.1.2 吸能容量 W_1

a) 考虑能量最大的滑差过电压，按公式 (2)， $W_1 = \bar{U} \bar{I} T$ ，取 $\bar{U} = U_{res1} = 2100V$ ， $\bar{I} = 0.8I_{FN} = 0.8 \times 4158 = 3326A$ ， $T = 0.125s$ ，则 $W_1 = 2100 \times 3326 \times 0.125 = 0.873 \times 10^6 J = 0.873MJ$ 。

b) 由灭磁能量计算^[9]（从略），选择 $W_1 = 18MJ > 0.873MJ$ 。

3.3.1.3 动作电压

a) 计算 RV1 的压敏电压 U_{10mA1}

按每片 ZnO 阀片标称能容量 15KJ，整组均能系数 0.95 考虑，总片数 $N = 18000 / (15 \times 0.95) = 1263$ 片，取整为 $N = 1280$ 片。设计 4 片串联为一组，则并联路

数为 $m=N/4=1280/4=320$ 路，整组为 4 串 320 并。

据三峡发电机灭磁计算^[9]，最大灭磁电流 $I_{fm}=19069A$ ，分配到每个支路的电流为 $19069/320\approx 60A$ 。

据本公司高能 ZnO 阀片特性，残压比 $U_{60A}/U_{10mA}\approx 1.4$ ，故 $U_{10mA1}=U_{60A}/1.4=U_{res1}/1.4=2100/1.4=1500V$ 。

b) 计算正常运行时励磁电压的正反向峰值

励磁电压波形如图 10 所示。

因三相可控桥式整流有如下关系：

$U_f=1.35U_{2N}\cos\alpha$ (α 为控制角)，故

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{U_f}{1.35U_{2N}};$$

$$\begin{aligned} \text{额定励磁时, } \alpha_N &= \cos^{-1}(U_{fN}/1.35U_{2N}) \\ &= \cos^{-1}[475.9/(1.35 \times 1243)] = 73.5^\circ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{空载励磁时, } \alpha_0 &= \cos^{-1}(U_{f0}/1.35U_{2N}) \\ &= \cos^{-1}[191.8/(1.35 \times 1243)] = 83^\circ. \end{aligned}$$

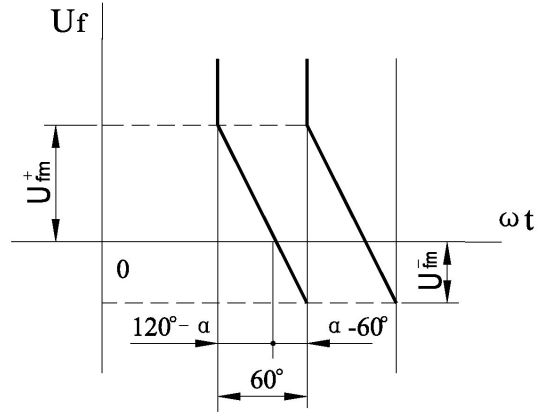


图 10 励磁电压波形图

正常运行励磁电压正向峰值最大出现在额

定励磁时，该值（不计换向毛刺电压） $U_{fm}^+ = \sqrt{2} U_{2N} \sin(120^\circ - \alpha_N) = \sqrt{2} \times 1243 \sin(120^\circ - 73.5^\circ) = 1275V$ ；

正常运行励磁电压反向峰值最大出现在空载励磁时，该值 $U_{fm}^- = \sqrt{2} U_{2N} \sin(\alpha_0 - 60^\circ) = \sqrt{2} \times 1243 \sin(83^\circ - 60^\circ) = 687V$ 。

c) 核算 RV1 的荷电率

“标准” 4.4.5 a) 要求：“在额定工况下，(ZnO) 元件负荷率（即荷电率）应小于 60%”。RV1 正向有可控硅 V1 和二极管 V3 阻断，基本不承受电压；反向最大承压为 $U_{fm}^- = 687V$ ，荷电率 $S_i = U_{fm}^- / U_{10mA1} = 687/1500 = 0.458 < 60%$ ，合格！

d) 动作电压

“标准” 4.4.4 a) 要求：“动作电压最低瞬时值应高于最大整流电压的峰值”；4.2.15 要求：“当励磁电流在小于 1.1 倍额定励磁电流下长期运行时，励磁绕组两端电压的最大瞬时值（注：包括换向过电压尖峰），不得超过出厂试验时该绕组对地耐压试验电压幅值的 30%”。计算该值为， $\sqrt{2} \times 10 U_{2N} \times 0.3 = \sqrt{2} \times 10 \times 475.9 \times 0.3 = 2019V$ 。

动作电压最高瞬时值已由本文 3.3.1.1 b) 计算得 4711V。在 2019~4711V 之间偏中间取 RV1 正向动作电压为 3200V。

反向动作电压即为 RV1 的导通电压 $U_{10mA1} = 1500V$ 。

3.3.2 电源侧过电压保护 RV2

3.3.2.1 吸能容量 W_2

a) 励磁变漏抗及漏感的计算

励磁变二次侧等效转换成 Y 接法，其等效电路如图 11 所示，折算到二次侧的每相漏抗为 X_b ，忽略相对很小的绕组电阻。

$$\text{二次侧线电流有效值 } I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = 3 \times 2925$$

$$\times 10^3 / (\sqrt{3} \times 1243) = 4076 \text{ A},$$

$$X_b = U_k \times \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}I_{2N}} = 0.08 \times 1243 / (\sqrt{3} \times 4076)$$

$$= 0.014 \Omega,$$

相应的每相漏电感

$$L_b = X_b / 2\pi f = 0.014 / 314 = 4.46 \times 10^{-5} \text{ H}.$$

b) 引线电感

查手册^[10]知，一般 3~10kV 三芯电缆每公里长度感抗为 0.08 Ω /km，单芯电缆为 0.18 Ω /km，三峡大机组选单芯电缆，设电缆长度为 0.1km，感抗为 $X_s = 0.1 \times 0.18 = 0.018 \Omega$ 。因励磁变一次侧引线较短，全部长度均算到二次侧。二次侧每相引线的电感量 $L_s = X_s / 2\pi f = 0.018 / 314 = 5.73 \times 10^{-5} \text{ H}$ 。

c) 最大灭磁电流时电源侧的能量 W_b

据三峡发电机灭磁计算^[9]，最大灭磁电流 $I_{fm} = 19069 \text{ A}$ 。励磁变二次侧流过的电流为方波形的交变直流电流，每个瞬间只有两相通流，故电感能量为 $W_b = 2 \times 0.5 \times (L_b + L_s) I_{fm}^2 = 2 \times 0.5 \times (4.46 + 5.73) \times 10^{-5} \times 19069^2 = 37.1 \times 10^3 \text{ J} = 37.1 \text{ KJ}$ 。

实际配置时考虑每个 ZnO 支路均串联特种保护熔断器 TRD，避免单路工作时 TRD 熔断造成开路，故至少配二路并联；又因残压较高，每支路要 4 片串联，故 RV2 至少为 4 串 2 并 8 片。采用和 RV1 同样的阀片，标称能容 15KJ/片，均能系数 0.95，总组吸能容量 $W_2 = 8 \times 15 \times 0.95 = 114 \text{ KJ} > 37.1 \text{ KJ}$ 。

3.3.2.2 动作电压和残压

由于 RV2 的能容量比 RV1 小得多，所以在正常运行两者并联时希望 RV2 不吸收能量而只由 RV1 吸能。为此把 RV2 的动作电压比 RV1 提高 200V，正向动作电压 3400V，反向动作电压 1700V。 $U_{10mA2} = 1700 \text{ V}$ ，残压比 $U_{200A} / U_{10mA} \leq 1.6$ ，故残压 $U_{200A} \leq 1700 \times 1.6 = 2720 \text{ V}$ 。最大电流 (19069/2)A 下的残压会比 U_{200A} 高，但因 ZnO 的优良非线性伏安特性，保证不会超过“标准”规定的上限 4711V。

以上参数全部满足“标准”的要求。

3.3.3 交流侧过压保护 GRC

本方案的原理电路并不新鲜，一般教科书^[1]中早有介绍，但其阻容参数的选择却有一番研究。教科书中选择 C 容量的出发点是吸收整流变空载拉闸时漏感的磁能，但实际上机端自并励系统的励磁整流变不可能有这种工况，所以这种容量计算在这里就无实际意义。这里要吸收的是可控硅换相时反向恢复电流在励磁变漏

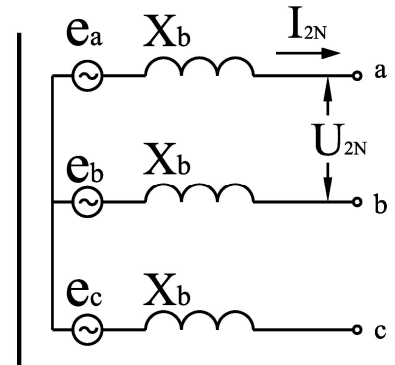


图 11 励磁变二次等效电路图

感及引线电感中产生的磁能，如本文 1.1 所分析的。详细的分析计算比较繁杂，限于篇幅不拟在这里探讨。

我们经过仔细的理论分析和大量的实际验证，掌握了根据限压要求及电路参数计算电容量 C 、电阻值 R 及电阻功率 W_R 的方法，可以较准确地配置 RC 参数以达到理想的尖峰过电压吸收效果，并保证 GRC 安全可靠运行，电阻表面温升不超过 120°K 。根据我们掌握的计算方法，初步设计三峡 ABB 发电机励磁系统配用 GRC 主要元件参数如下： $C=25\ \mu\text{F}$ ， C 的耐压为直流 5000V ； $R=329\ \Omega$ ， R 的发热功率 $W_R=14.9\ \text{kW}$ 。限压效果是额定励磁电流运行时，换相过电压尖峰不超过阳极电压峰值的 1.5 倍 (2637V)。以上计算没考虑电路中的其他阻容吸收措施（如功率整流桥臂上的 RC 吸收）。

以上属抛砖引玉，供同行们参考。

参 考 文 献

- [1] 西安交通大学 黄俊，半导体变流技术，机械工业出版社，1980 年第一版
- [2] 李基成，现代同步发电机整流器励磁系统，水利电力出版社，1987 年 12 月第一版
- [3] 华中工学院 许实章，电机学，机械工业出版社，1981 年 4 月第一版
- [4] 李自淳，淮南化肥厂 630kW 同步电动机用压敏电阻启动实验报告，1988 年 5 月
- [5] 王维俭，电力系统继电保护基本原理，清华大学出版社，1991 年 2 月第一版
- [6] 史家燕，国产 TQN-100-2 型汽轮发电机失磁异步运行试验报告，1982 年 3 月
- [7] 中国电力行业标准，DL/T 650-1998《大型汽轮发电机自并励静止励磁系统技术条件》
- [8] 中国电力行业标准，DL/T 583-1995《大中型水轮发电机静止整流励磁系统及装置技术条件》
- [9] 李自淳等，同步发电机灭磁电阻的吸能容量，2001 年
- [10] 西北、东北电力设计院，电力工程设计手册（第一册），人民出版社，1972 年 3 月第一版