

中国科学院 水利水电科学研究院
水利电力部

科学研究论文集

第 24 集

(自动化、 计算技术)

水利电力出版社

内 容 提 要

本书共有十三篇科研论文和两篇硕士研究生毕业论文摘要,内容包括 水轮发电机组励磁方式的研究及水轮发电机转子过电压的分析计算,调节对象特性和调速器参数对调节时间的影响,椭圆函数数字滤波器,轴流式水轮机叶片的优化设计,计算机软件工程,计算机在实现水电厂最优运行及溢流坝流场计算中的应用,以及病态方程和 HILBERT 阵用于验机,计算机资源的最优配置,增加冗余位的改进 BCH 码及其软件的编译等。

本书可供从事水电站自动化、计算机应用方面的设计、科研、运行管理的工程技术人员阅读,以及大专院校有关专业的师生参考。

中国科学院
水利电力部 水利水电科学研究院

科学研究论文集

第 24 集

(自动化、计算技术)

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

华欣印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 10印张 220千字

1987年7月第一版 1987年7月北京第一次印刷

印数0001—1880册 定价2.40元

书号 15143.5984

目 录

两种大扰动过程中水轮发电机转子过电压的分析计算	许可达 李 伟 (1)
大型水轮发电机组励磁方式研究	聂光启 章 贤 (20)
调节对象特性和调速器参数对调节时间的影响	常兆堂 王 东 (34)
富春江水电厂优化发电控制	屠明德 马长乐 潘 同 (47)
椭圆函数数字滤波器计算机设计	杨惠生 (58)
过溢流坝水流的流场数值计算应用软件	孙晓霞 张 庄 周 胜 高需生 (72)
鼻坎上自由挑射水流流场的数值分析	张 庄 孙晓霞 (84)
关于软件工程的若干问题	莫渭浓 阎继军 (93)
轴流式水轮机转轮水力计算	古林涛 田玉英 (99)
电力系统潮流的递推算法	聂光启 章 贤 (114)
计算机辅助优选稳态数据滤波方案	张恩民 (122)
病态线性代数方程组在考验计算机中的应用	林明璦 (127)
HILBERT阵验机	林明璦 (136)
实时计算机系统最优资源配置问题的研究	夏红星 (142)
一种纠一检错码及其微型磁机码	杨 林 (148)

两种大扰动过程中水轮发电机 转子过电压的分析计算

许可达 李 伟

【提 要】近代大型水轮发电机广泛采用静止可控硅励磁系统，由于某些大的扰动，例如发电机失磁造成异步运行、非同期合闸，会使得发电机转子电流中产生一个较大的交变分量，导致转子电流变负，产生很高的转子过电压。

本文建立了上述两种大扰动的数学模型，用大型数字计算机计算了多种工况，然后进行分析比较，总结出规律性的认识，对如何设计转子过电压保护有理论指导意义。

一、概 述

近代大型水轮发电机大都采用静止可控硅励磁系统，由于某些大的扰动，例如发电机失磁造成异步运行、非同期合闸、各种短路等，使得发电机转子电流中产生一个较大的交变分量，当它与直流分量相比足够大时，就会导致转子电流变负，可控硅整流装置截止。转子电流只得通过转子槽壁等形成通路，因而产生很高的转子过电压。我们称为暂态过电压，以与灭磁过程中产生的过电压相区别。

转子暂态过电压往往数值很高，会击穿可控硅整流器，烧坏电压调节器元件以及损坏励磁绕组绝缘，造成励磁系统正负短路或一点及几点对地短路，使发电机不能正常运行，严重的会直接烧损发电机。因此，为了保护发电机转子及励磁回路，正确地分析和计算这种转子过电压，是很有必要的。

本文分析了失磁及非同期合闸两种暂态过电压的机理，先建立水轮发电机及其励磁系统的数学模型，模拟产生转子过电压的原因，用大型数字计算机进行计算，然后对大量的计算结果进行分析比较，得出规律性的认识。

二、水轮发电机及其励磁、调速系统的数学模型

(1) 采用七阶派克方程精细地描述大型水轮发电机的电磁、机电关系。为了准确计算转子电流及电压，纵轴等值电路中考虑了励磁绕组与阻尼绕组之间的公共漏磁通，因而增加了电抗 X_{rc} ^[1]，还考虑了凸极机转子槽壁的影响^[2]，方程如下：

$$\psi = A i \quad (1)$$

$$\text{式中 } \Psi = \begin{pmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{pmatrix}; \quad I = \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix}; \quad A = \begin{pmatrix} -X_{d\sigma} & 0 & X_{ad} & X_{ad} & 0 \\ 0 & -X_{q\sigma} & 0 & 0 & X_{aq} \\ -X_{ad} & 0 & X_f + X_{r\sigma} & X_{ad} + X_{r\sigma} & 0 \\ -X_{aq} & 0 & X_{ad} + X_{r\sigma} & X_D + X_{r\sigma} & 0 \\ 0 & -X_{aq} & 0 & 0 & X_Q \end{pmatrix}$$

$$p\Psi = 314U - 314\omega G I - 314RI \quad (2)$$

$$\text{式中 } p = \frac{d}{dt}, \quad t \text{ (秒)};$$

$$G = \begin{pmatrix} 0 & X_{q\sigma} & 0 & 0 & -X_{aq} \\ -X_{d\sigma} & 0 & X_{ad} & X_{ad} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$R = \begin{pmatrix} -r_a & & & & \\ & -r_a & & & \\ & & r_f & & \\ & & & r_D & \\ & & & & r_Q \end{pmatrix}$$

(1) 与 (2) 合并为五阶微分方程组:

$$pI = 314A^{-1}U - 314\omega A^{-1}GI - 314A^{-1}RI \quad (3)$$

转子运动方程:

$$T_J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \quad (4)$$

式中 T_e ——电磁力矩, $T_e = I^T G I = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d$;

T_m ——调速器方程输出机械力矩;

D ——阻尼系数, $D = 1$, $\omega_0 = 1$;

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega - \omega_0) 314. \quad (5)$$

当转子中励磁电流 $i_f < 0$ 时转为截止模型, 反向的转子电流从转子槽壁形成通路, 电阻为 r_{fE} 。所以电压方程式变为 $0 = p\Psi_f + r_{fE}i_f$, 派克方程中

$$R \text{ 阵为 } \begin{pmatrix} -r_a & & & & \\ & -r_a & & & \\ & & r_{fE} & & \\ & & & r_D & \\ & & & & r_Q \end{pmatrix}$$

$$U \text{ 阵为 } \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

此时励磁绕组两端感应电压为 $u_{fE} = p\Psi_f = -r_{fE}i_f$ 。从截止模型转回导通模型的条件是 $i_f > 0$, 此时, R 阵为

$$U \text{ 阵为 } \begin{pmatrix} -r_a & & & & \\ & -r_a & & & \\ & & r_f & & \\ & & & r_D & \\ & & & & r_Q \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \\ u_f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

两组模型可以灵活地交替采用。

(2) 调速器对转子过电压计算关系不很大, 所以采用通用的比较简明的调速器数学模型, 框图如下:

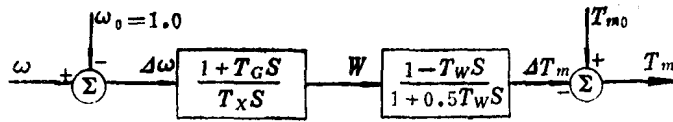


图1 调速器数学模型框图

(3) 励磁系统及电压调节器的性能对转子过电压影响较大, 所以详细考虑大中型水轮发电机不同的励磁方式及不同的电压调节器, 分别采用以下三种模型。

1) 余弦移相的自并激(自复激)方式配可控硅励磁调节器, 如图2所示。

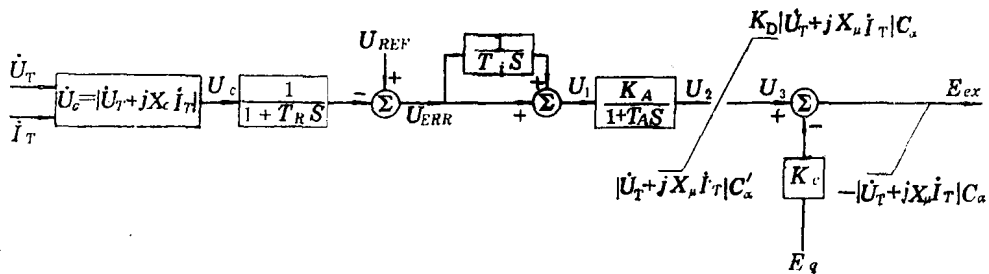


图2 自并激(自复激)方式配可控硅励磁调节器框图

($X_u = 0$ 自并激)

2) 直流励磁机配可控硅励磁调节器, 如图3所示。

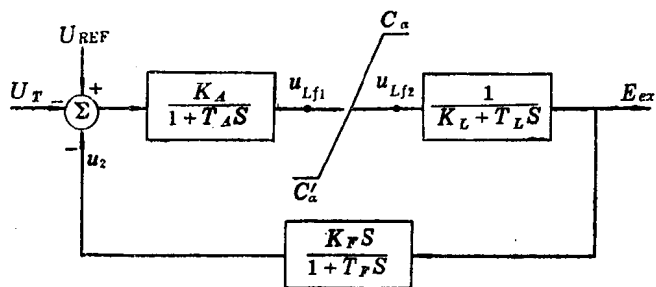


图3 直流励磁机配可控硅励磁调节器框图

3) 直流励磁机配相复励调节器, 如图4所示。

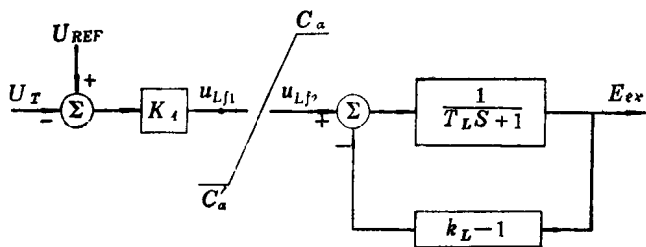


图4 直流励磁机配相复励调节器框图

三、转子过电压计算步骤

转子过电压计算程序总框图, 如图5所示。

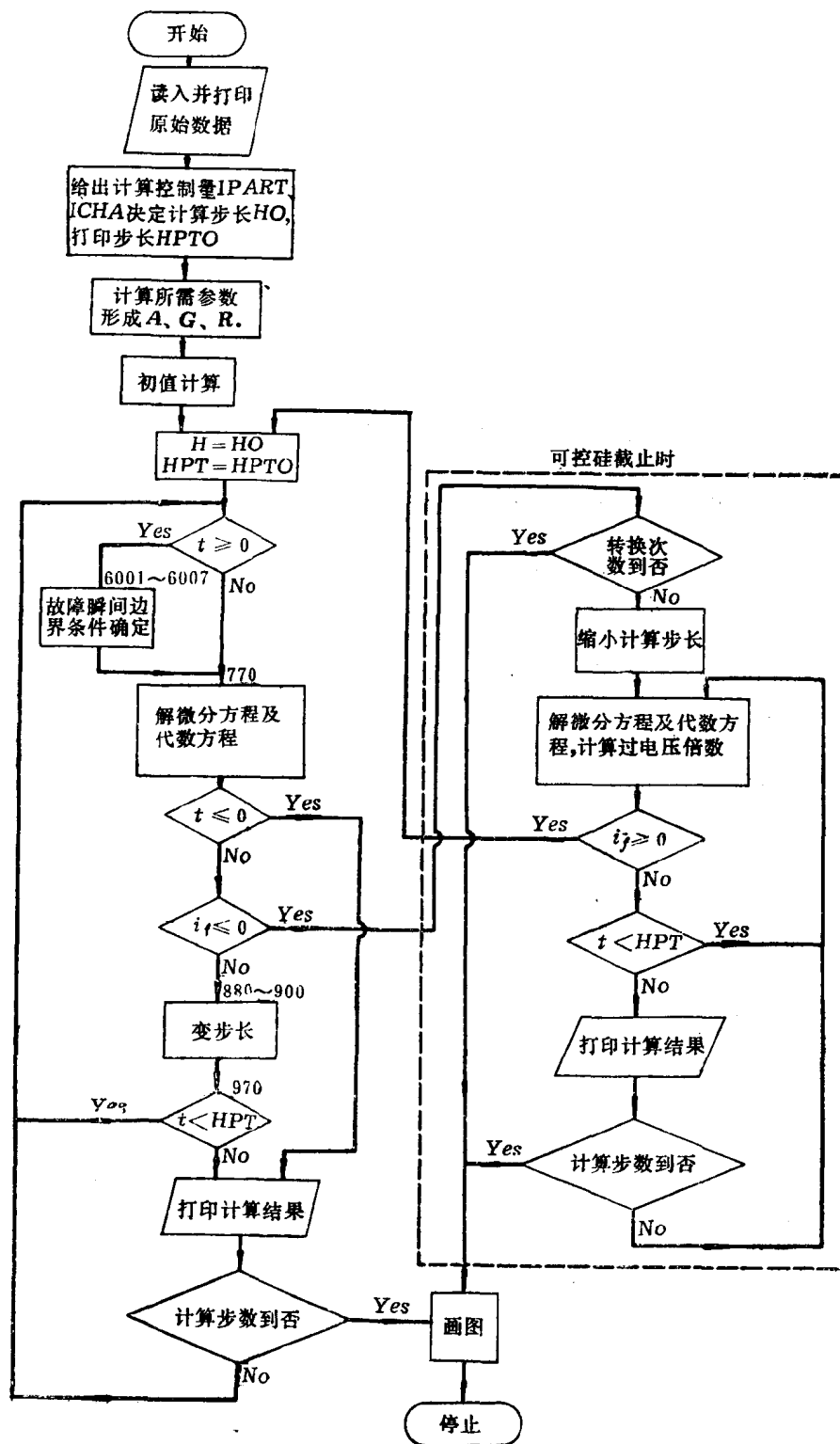


图5 转子过电压计算程序总框图
IPART= 1失磁; ICHA=1~5; IPART= 2误同期合闸; ICHA=7~9; IPART=3短路; ICHA=10~13

四、暂态转子过电压的机理分析

发电机暂态过程中, 励磁绕组磁链方程为:

$$\psi_f = -X_{ad}i_d + (X_f + X_{ro}) i_f + (X_{aa} + X_{ro}) i_D \quad (6)$$

电压方程为:

$$u_f = \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f \quad (7)$$

$$\text{由式 (7) } i_f = \frac{u_f}{r_f} - \frac{\frac{d\psi_f}{dt}}{r_f} = i_f(0) + i_f'$$

$$i_f(0) = \frac{u_f}{r_f} \quad \text{稳态运行时励磁电流值 (正值)}$$

$$i_f' = -\frac{\frac{d\psi_f}{dt}}{r_f} \quad \text{暂态过程引起的励磁电流分量 (可正可负)}$$

暂态过程中若 $\psi_f \nearrow$ 则 $\frac{d\psi_f}{dt} > 0$, $i_f' < 0$ 使 i_f 阻碍 ψ_f 进一步增加; 若 $\psi_f \searrow$ 则 $\frac{d\psi_f}{dt} < 0$, $i_f' > 0$ 使 i_f 阻碍 ψ_f 进一步减小。

总之, i_f' 的作用相当于较强的负反馈, 使 $|\frac{d\psi_f}{dt}|$ 不可能很大。 r_f 又较小, 所以转子电压 u_f 不会很高。由于某种大的扰动 $\frac{d\psi_f}{dt}$ 很大时, 会造成 $i_f = i_f(0) + i_f' < 0$, 这时可控硅整流器截止, 相当于开路, 反向的转子电流只能通过较高电阻 ($r_{fE} = 400r_f$) 的转子槽壁 (不计电容作用) 形成通路。

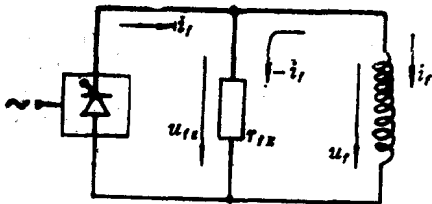


图6 可控硅整流器导通与截止时电流、电压的方向

电压方程为

$$0 = \frac{d\psi_f}{dt} + r_{fE} i_f \quad (8)$$

$$\text{所以 } i_f = -\frac{\frac{d\psi_f}{dt}}{r_{fE}} \quad (9)$$

当 $\frac{d\psi_f}{dt}$ 变化时, 由于 r_{fE} 很大, i_f 变化

不大, 负反馈作用很弱, 因而 $u_{fE} = \frac{d\psi_f}{dt}$

$= -r_{fE} i_f$ 会很大。因此暂态转子过电压是随着励磁电流正负摆动的周期交替出现的, 其大小与反向 i_f 大小有关, 一般为时间很短的尖脉冲。

五、发电机失磁导致异步运行, 引起发电机转子过电压的分析计算

1. 数学模型

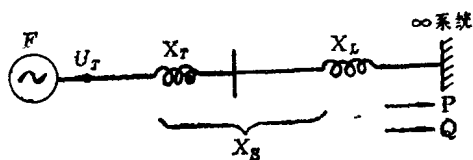


图7 失磁计算系统简图

单机对无穷大系统, X_T 为主变压器电抗 (图7)

$$X_T = \frac{u_K}{100} \times \frac{S(B)}{S_H} \quad (10)$$

式中 u_K ——主变压器短路电压 (百分比);

$S(B)$ ——以发电机额定容量作为计算的基值 (MVA);

S_H ——主变压器额定容量。

X_L 是线路电抗, 计算时用220kV、50km线路参数为典型实例, 然后折算到基值。

$$X_s = X_T + X_L \quad (11)$$

$$X_{d\Sigma} = X_d + X_s \quad (12)$$

$$X_{\Sigma\Sigma} = X_{\Sigma} + X_s \quad (13)$$

计算时带水轮机调速器, 由于是失磁故障, 故不带电压调节器 (ZLT)。

模拟失磁方式, 最关键的是找出不同失磁方式下励磁电压 u_f 的规律。

(1) 经整流器闭路失磁 (整流器三相交流电源中断时, 励磁绕组经整流器闭路):
 $t \geq 0$, u_f 突变为0。

(2) 由于调节器故障或整流桥可控硅故障引起部分失磁:

部分失磁 I: $t \geq 0$ u_f 突变为 $0.3u_f(0)$ $u_f(0)$ 是正常稳定运行时 u_f 值。

部分失磁 II: $t \geq 0$ $u_f = u_f(0) (0.7e^{-\frac{t}{\tau}} + 0.3)$ (14)

按指数规律下降。

(3) 经灭磁电阻 r_z 短路引起失磁: $t \geq 0$ u_f 突变为0; r_f 突变为 $r_f + r_z$, r_f 为转子在130℃时的热态电阻值。

(4) 灭磁开关误跳引起失磁, 这时电压调节器 (ZLT) 是投入的。

1) $t \leq 0.0056$, 发电机稳定运行

$$u_f = E_{ex} \frac{r_f}{X_{ad}} \quad (15)$$

式中 E_{ex} ——ZLT输出。

2) $0.0056 < t \leq 0.04$, 灭磁开关弧触头开始拉弧至电弧被吹进灭弧栅的时间*。灭磁开关两端电压

$$U_{FMK} = \frac{35n}{0.04 - 0.0056} \times \frac{t - 0.0056}{u_{f0}} \quad (16)$$

式中 n ——灭弧栅片数;

u_{f0} ——空载励磁电压 (伏)。

3) $0.04 < t < t_3$, 电弧在弧室中燃烧

* 引自《葛洲坝十七万千瓦机组转子过电压问题初步探讨》, 葛洲坝电厂, 曾秉谦, 1982年5月。

$$U_{FMK} = \frac{35n}{u_{f0}} \quad (17)$$

以上2)、3)两阶段中:

$$u_f = E_{ex} \frac{r_f}{X_{sd}} - U_{FMK} \frac{u_{f0}}{u_f(B)} \quad (18)$$

式中 $u_f(B)$ ——计算所取励磁电压基值(V);

当 $i_f = \frac{5}{i_f(B)}$ 时即为 t_s

$i_f(B)$ ——计算所取励磁电流基值(A)。

4) $t \geq t_s$, u_f 突变为0, 并转可控硅截止模型。

2. 程序框图(图8)

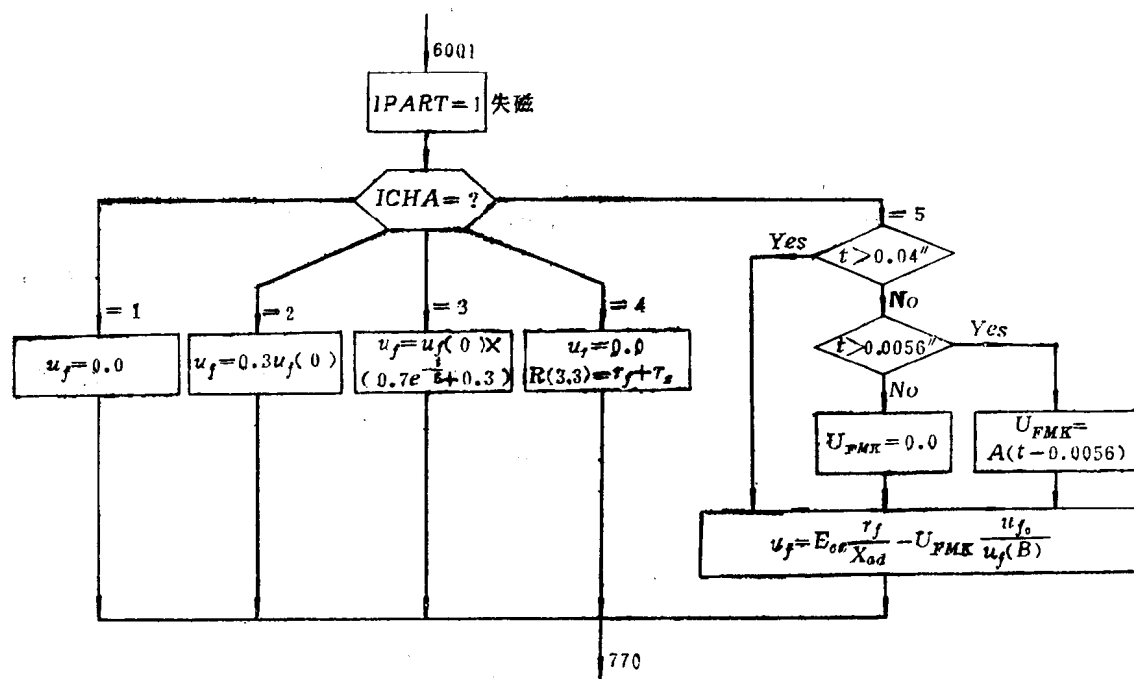


图8 失磁计算程序中“故障瞬间边界条件确定”详细框图

ICHA = 1为经整流器闭路失磁;

ICHA = 2为部分失磁 I;

ICHA = 3为部分失磁 II;

ICHA = 4为经灭磁电阻 r_s 短路;

ICHA = 5为灭磁开关误跳灭磁, 其中 $\Lambda = \frac{35n}{u_{f0}(0.04-0.0056)}$

可见, T_d' 越小, 直流分量衰减越快, C_1 越大, 交变分量幅值越大, 就越容易出现 i_f 摆动到负值, 越容易出现过电压。

从表 1 可见, 丰满、潘家口、丹江口机组 T_d' 相对较小, C_1 相对又较大, 所以过电压倍数大 ($11 \sim 12 u_{fN}$), 出现过电压的时间较早 ($5.1'' \sim 5.5''$)。

葛洲坝大机 (SF170—110/1760)、小机 (SF125—96/1560) T_d' 相对较小, 但 C_1 也较小, 所以过电压倍数不大 ($8.1 \sim 8.2 u_{fN}$), 但出现过电压的时间很早 ($4.1'' \sim 4.6''$)。

其中龙羊峡机组经整流器闭路失磁后, 定子电压、电流、励磁电流、过电压计算曲线, 见图 9。

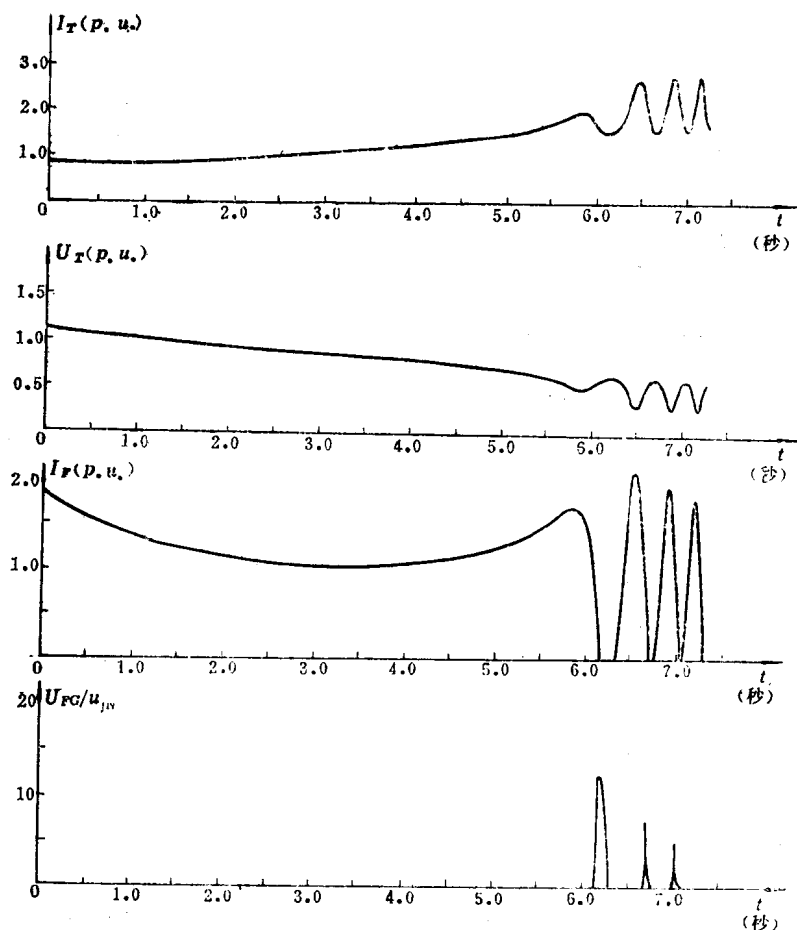


图 9 龙羊峡机组经整流器闭路失磁后定子电压、电流、励磁电流、过电压曲线图

失磁前 $P=0.8$, $Q=0.3$, 带调速器, 不带 ZLT, $r_{tE}=400 r_t$

(2) 以龙羊峡机组为例, 当发电机与系统间联系电抗 X_s 不同时, 发生经整流器闭路失磁计算结果见表 2。

3. 计算结果及分析

(1) 龙羊峡等九台机组经整流器闭路失磁计算结果见表1。失磁前工况 $P=0.8$, $Q=0.3$, 转子槽壁电阻 $r_{fE}=400r_f$ 。

表1

电站	机 组 型 号	$i_f(0)$	X_s	T'_d	C_1	第一次过电压		第二次过电压		第三次过电压	
		(P.u.)	(P.u.)	(秒)	计算值	最大倍数 (对 u_{fN})	出 现 时 间	最大倍数 (对 u_{fN})	出 现 时 间	最大倍数 (对 u_{fN})	出 现 时 间
龙羊峡	SF320—48/1280G	1.8693	0.2862	2.9955	1.2425	12.03	6.178 "	7.16	6.706 "	4.95	7.033 "
白 山	SF300—48/1230	1.9899	0.2762	3.2280	1.2161	10.15	6.430 "	4.60	6.849 "	3.00	7.100 "
刘家峡	SF225—48/1260	1.9888	0.2382	2.5572	1.4290	10.61	6.291 "	7.31	6.785 "	5.94	7.063 "
乌江渡	SF210—40/1035	1.7903	0.2378	2.4453	1.3941	11.49	5.992 "	9.26	6.682 "	7.74	7.122 "
葛洲坝	SF170—110/1760	2.4110	0.2030	1.8718	1.4153	8.20	4.656 "	6.28	5.158 "	5.46	5.486 "
	SF125—96/1560	2.1155	0.1807	1.7164	1.3051	8.15	4.097 "	6.16	4.565 "	5.45	4.878 "
丹江口	SF150—60/1280	1.8713	0.1921	1.8436	1.5933	11.11	5.153 "	9.66	5.751 "	8.83	6.140 "
潘家口	SF150—60/1280	1.8713	0.1921	1.8343	1.5933	11.20	5.119 "	9.63	5.686 "	8.58	6.040 "
丰 满	SF60—48/817	2.1428	0.1180	1.5505	2.060	12.54	5.537 "	12.75	6.376 "	11.60	6.874 "

发电机励磁绕组经整流器闭路失磁时, $i_f > 0$ 时忽略整流器压降即为直接短路失磁, 转子电流表达式为:

$$i_f = i_f(0) e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{1}{X_{d\Sigma}} \frac{X_{ad}}{X_f} \frac{sT'_{d0} \cdot 314}{\sqrt{1 + (sT'_{d0} \cdot 314)^2}} \cos(\delta_0 - st - \alpha) \quad (19)$$

式中 $T'_{d0} = \frac{X_f}{r_f \cdot 314}$;

$$T'_d = T'_{d0} \frac{X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma}} ;$$

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \frac{1}{sT'_{d0} \cdot 314} \circ$$

上式中直流分量为 $i_f(0) e^{-\frac{t}{T'_d}}$, 它是从 $i_f(0)$ 起按 T'_d 时间常数衰减的。交变分量幅值为:

$$\frac{1}{X_{d\Sigma}} \frac{X_{ad}}{X_f} \frac{sT'_{d0} \cdot 314}{\sqrt{1 + (sT'_{d0} \cdot 314)^2}} \approx \frac{1}{X_{d\Sigma}} \frac{X_{ad}}{X_f} \frac{sT'_{d0} \cdot 314}{sT'_{d0} \cdot 314} = \frac{X_{ad}}{X_f X'_{d\Sigma}} \quad (20)$$

(因为 $sT'_{d0} \cdot 314 \gg 1$)

$$\text{令} \quad C_1 = \frac{X_{ad}}{X_f X'_{d\Sigma}} \quad (21)$$

表 2

X_s (P.u.)	$i_f(o)$ (P.u.)	T'_d (秒)	C_1 计算值	失步时		第一次过电压		第二次过电压		第三次过电压	
				t (秒)	S (%)	最大倍数 (对 u_{fN})	出现时间 (秒)	最大倍数 (对 u_{fN})	出现时间 (秒)	最大倍数 (对 u_{fN})	出现时间 (秒)
0.1480	1.7630	2.6005	1.5901	7.10	1.01	13.61	7.4555	0.53	8.4485	13.25	11.6875
0.2194	1.8177	2.8150	1.3893	6.40	1.14	13.18	6.7257	9.65	7.4090	8.11	7.8580
0.2862	1.8693	2.9955	1.2425	5.85	1.16	12.04	6.1785	7.16	6.7055	4.91	7.0330

由表 2 可见, 联系电抗 X_s 增大, T'_d 也增大, 直流分量衰减变慢, C_1 减小, 交变分量幅值减小, 使转子电流 i_f 负得较小, 过电压倍数减小, 但 X_s 增大后, 失磁后发电机失步时间较早, 失步时滑差也较大。

(3) 以葛洲坝小机为例, 比较参数不同、运行工况不同、失磁方式不同时转子过电压的情况, 计算结果见表 3。

表 3

失磁方式	r_{fE} (或 r_z)	失磁前工况	$r_D \cdot r_Q$	第一次过电压		第二次过电压		第三次过电压	
				最大倍数 (对 u_{fN})	出现时间 (秒)	最大倍数 (对 u_{fN})	出现时间 (秒)	最大倍数 (对 u_{fN})	出现时间 (秒)
经整流器闭路	$400r_f$	$P=0.8, Q=0.3$	机组本身值	8.15	4.0970	6.16	4.5650	5.45	4.8780
经整流器闭路	$400r_f$	$P=0.3, Q=0.1$	机组本身值	3.39	11.5180	/	/	/	/
经整流器闭路	$154r_f$	$P=0.8, Q=0.3$	机组本身值	7.89	4.1040	5.16	4.5710	4.35	4.8820
经整流器闭路	$400r_f$	$P=0.8, Q=0.3$	加倍	10.04	3.9020	7.27	4.3080	6.97	4.5840
经灭磁电阻 r_z 短路	$r_z=5r_f$	$=0.8, Q=0.3$	机组本身值	8.71 -7.75	1.3950 1.6845	7.70 -7.41	1.9045 2.0945	7.25 -7.09	2.2645 2.4145
部分失磁 I	$400r_f$	$P=0.8, Q=0.3$	机组本身值	8.02	7.5190	4.17	7.9700	2.55	8.2670
部分失磁 II	$400r_f$	$P=0.8, Q=0.3$	机组本身值	7.99	15.2910	3.88	15.7390	2.06	16.0350
灭磁开关误跳	$400r_f$	$P=0.8, Q=0.3$	机组本身值	7.84 -9.25	1.1820 1.4580	9.90 -10.25	1.7080 1.9330	10.41 -10.41	2.1580 2.3730

从表 3 可以归纳分析出以下规律:

1) 失磁前工况不同 (P 、 Q 不同) 对失磁后出现转子过电压的情况影响很大。发电机在重负荷下 (如 $P=0.8, Q=0.3$) 失磁, 转子加速度大, 滑差 S 大, 因此发电机发生失步的时间早, i_f 摆到负值的时间早, 出现转子过电压时间就早, 而且倍数高。发电机在轻负荷下 (如 $P=0.3, Q=-0.1$) 失磁, 滑差 S 增长得很慢, 功角 δ 增长得也慢, 所以时间很长 (11.518") 才出现第一次过电压, 倍数亦不大。以后 δ 增大减小交替出现, δ 增大不到 240° 以上, 使交变分量一项永为正, 所以 i_f 摆动不到负值, 就不再出现转子过电压了。

2) 改变发电机结构参数 r_{fE} 、 r_D 、 r_Q 对转子过电压的影响。如果发电机转子是叠片极炳、实心轮幅时, 槽壁电阻 $r_{fE} \approx 400r_f$; 若转子是全实心极时, $r_{fE} \approx 154r_f$ 。计算结果表明, 若不计及转子表面涡流, 则全实心极时转子过电压要比叠片极略低一点。如果发电机阻尼绕组电阻加倍, 过电压倍数要增大, 但不是按比例地增大。

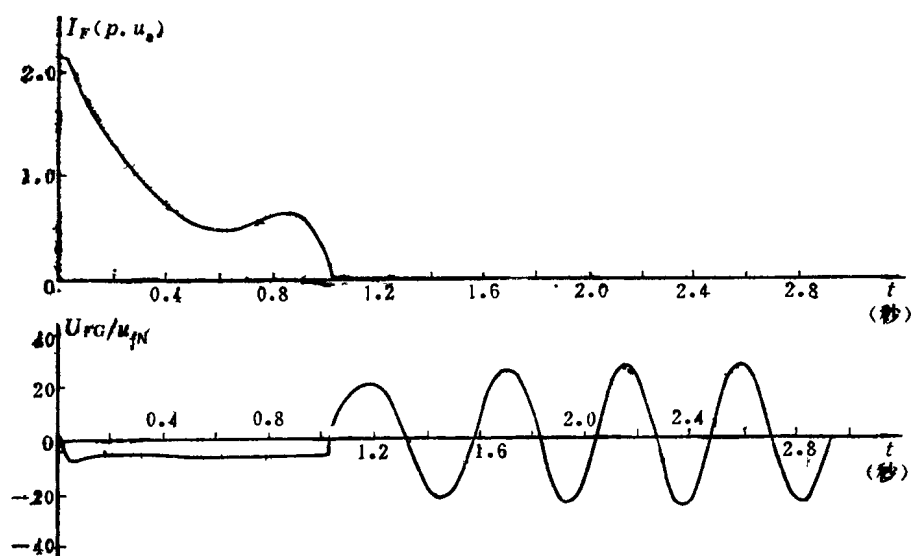


图10 葛洲坝小机灭磁开关误跳后开路失磁励磁电流、过电压曲线图

(失磁前 $P=0.3$, $Q=0.3$, 带调速器和ZLT, $r_{fE}=400r_f$)

3) 部分失磁故障下转子过电压情况: 由于部分失磁尚有剩余励磁电压 $0.3u_f(0)$, u_f 的变化不如经整流器闭路那样剧烈, 特别是部分失磁Ⅱ, 因此励磁电流的衰减比较缓慢, 出现转子过电压的时间很晚, 倍数也略低一些。

4) 励磁回路经灭磁电阻 r_z 短路失磁时, 当 i_f 摆动到负值时, 仍有 r_z 作为其通路, 因此转子过电压正、负交替出现, 数值较大, 但逐渐减小, 由于失步时间早了, 出现转子过电压的时间也早。

5) 灭磁开关误跳, 造成开路失磁。由于发电机仍与电网相连, 转子励磁绕组内会感应出交变的 i_f , 正、负 i_f 都只能从转子槽壁流通, 所以正、负转子过电压交替出现, 数值越来越大。由于开路失磁发电机很快失步, 所以出现转子过电压时间也早。葛洲坝小机灭磁开关误跳后开路失磁励磁电流、过电压计算曲线见图10。

六、非同期合闸后暂态过程中产生的发电机

转子过电压的分析计算

按照一般的准同期要求, 合闸瞬间发电机电压与系统电压之间幅值差不超过 $5\sim 10\%$, 相角差不超过 10° , 发电机频率与系统频率之差不超过 $0.2\sim 0.5\%$, 超出上述标准, 便认为是非同期合闸。

1. 数学模型 (图11)

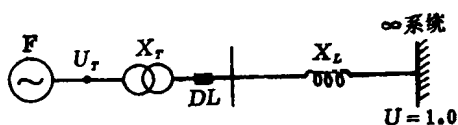


图11 非同期合闸时系统示意图

(1) DL合闸前 $t < 0''$ 。

发电机已升压到额定电压，空载， $U_T = 1.0$ ， $\delta = 0$ ， $P = Q = 0$ ， $\omega = 1.0$ ， $\omega_0 = 1.0$ 。已投入调速器及ZLT。

(2) 非同期合闸后 $t > 0''$ 。

1) 待并机组与系统之间：频率相同，电压幅值相同，相角不同。

$U = 1.0$ ， δ 突变，其他量不突变，

以 $\begin{cases} U_d = 1.0 \sin \delta \\ U_q = 1.0 \cos \delta \end{cases}$ 作为 $t = 0''$ 初值代入发电机七阶微分方程。

2) 待并机电压相角落后系统 20° ，幅值低于系统15%，频率相同。

$U = 1.15$ ， δ 突变为 -20° ，其他量不突变，

以 $\begin{cases} u_d = 1.15 \sin(-20^\circ) \\ u_q = 1.15 \cos(-20^\circ) \end{cases}$

作为 $t = 0''$ 初值代入发电机七阶微分方程。

3) 待并机组电压幅值与系统相同，相角落后系统 20° ，频率低于系统1%。

合闸前 $U_T = 1.0$ ， $\delta = 0$ ， $P = Q = 0$ ， $\omega = \omega_0 = 0.99$

合闸瞬间 $U = 1.0$ ， ω_0 突变为1.0， δ 突变为 -20° ，其他量不突变，

以 $\begin{cases} u_d = 1.0 \sin(-20^\circ) \\ u_q = 1.0 \cos(-20^\circ) \end{cases}$

作为 $t = 0''$ 初值代入发电机七阶微分方程。

2. 程序框图 (图12)

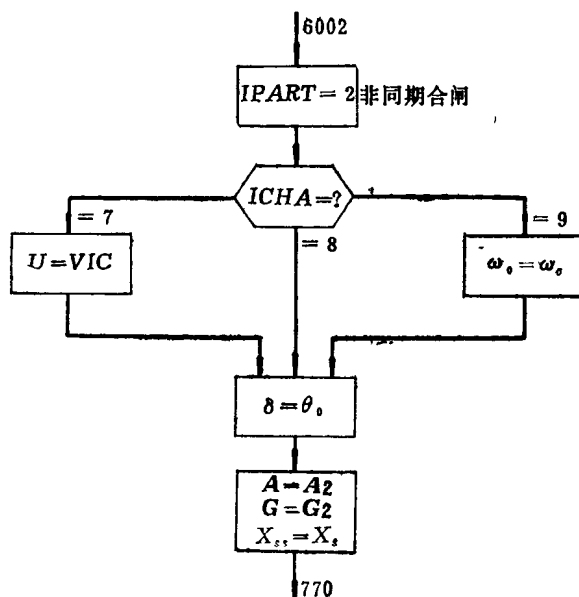


图12 非同期合闸计算程序中“故障瞬间边界条件确定”详细框图

ICHA=7 待并机组与系统 ω 相同, U 、 δ 不同;

ICHA=8 待并机组与系统 U 、 ω 相同, δ 不同;

ICHA=9 待并机组与系统 U 相同, δ 、 ω 不同;

合闸前 $X_c = X_T$, 合闸后 $X_c = X_T + X_L$

3. 计算结果及分析

(1) 龙羊峡等九台机组, 待并机组与系统频率相同, 电压幅值相同, 相角领先系统 60° ($\delta = 60^\circ$) 或落后系统 60° ($\delta = -60^\circ$)。经计算, 均未发生转子过电压的情况。其中龙羊峡机组非同期合闸后定子电压、电流、励磁电流计算曲线见图13。

从理论分析可知: 发电机端三相短路, 励磁电流 i_f 表达式为:

$$i_f \approx i_{f0} + \frac{X_d - X_d'}{X_d'} U_T \left\{ \left[e^{-\frac{t}{T_d'}} + (K - 1) e^{-\frac{t}{T_d}} \right] \cos \delta - K e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\omega_0 t + \delta) \right\} \quad (22)$$

式中 i_{f0} ——发电机空载励磁电流;

U_T ——以额定线电压有效值为基准的定子电压有效值;

$$K = \frac{X_d' X_d'' - X_c}{X_d'' X_d' - X_c} \quad (23)$$

$$X_c = X_L + \frac{X_{ad} X_{rc}}{X_{ad} + X_{rc}} \quad (24)$$

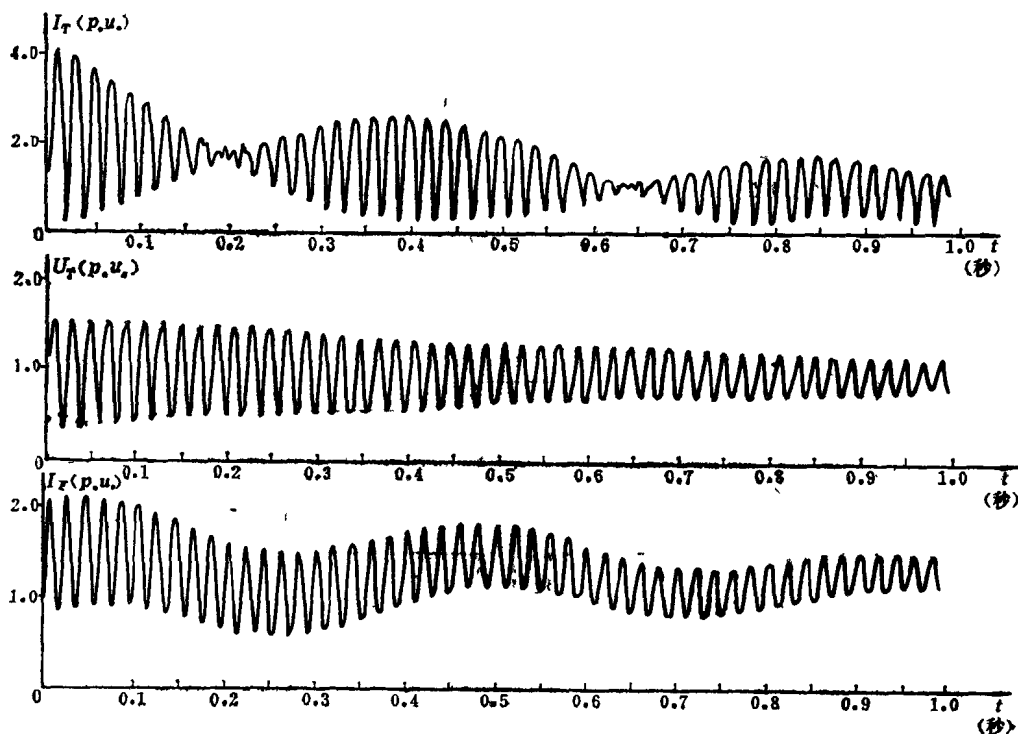


图13 龙羊峡发电机与系统频率相同, 电压幅值相同, 相位角落后 60° 非同期合闸时
定子电压、电流、励磁电流曲线图 (带调速器及ZLT)