

1 水电站电力系统机电暂态仿真的模块化模型

1.1 引言

本章介绍了水电站电力系统机电暂态仿真主要元件的数学模型及相关参数，如：水轮机，调速系统，励磁系统，同步发电机，输电线路及网络等。构造了基于隐式梯形积分法的水轮机及其调速系统、励磁系统、同步发电机和网络在仿真计算中的模块化模型。

1.2 数字模型

电站系统模型的基本组成框图见图 1 所示。将电站系统模型分割为电网和发电机组和辅机系统 3 个部分，发电机采用同步电机实用模型。本文将分割点设置在发电机定子绕组的虚拟电势处，通过预估 d、q 轴上电抗相等点的虚拟电势，获得该虚拟电势后 dq 轴电抗相等的定子绕组电压方程，则该定子绕组电压方程通过 dq 轴变换后并入电网求解时，所得的电网导纳矩阵的是线性、时不变的，简化了机网交替求解计算时电网方程的计算量。

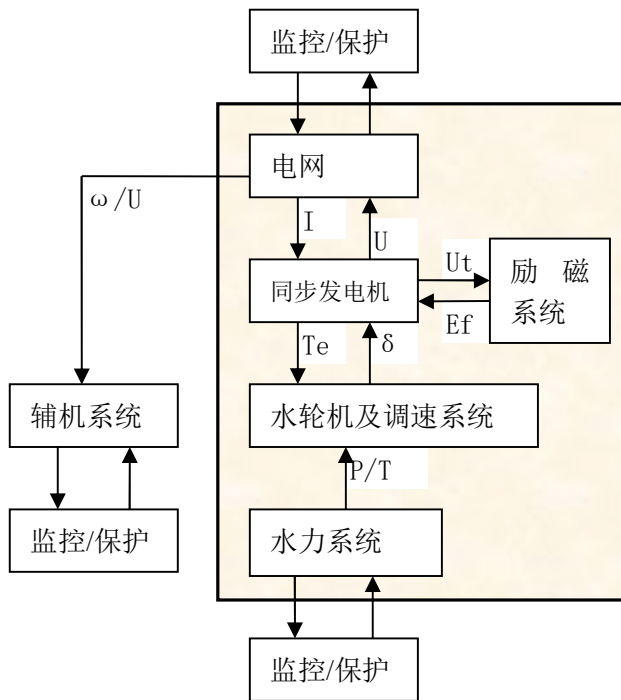


图 1 完整水电站模型框图

1.2.1 电网仿真模型

电网数学模型由 dq 轴变换后的发电机定子绕组电压方程和 n 节点的电网节点电压方程构成。

同步电机三阶或四阶实用模型的定子绕组电压方程为：

$$\begin{cases} U_d = E'_d + X'_q I_q - r_a I_d \\ U_q = E'_q - X'_d I_d - r_a I_q \end{cases} \quad (1)$$

将式（1）整理成矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_a & -X'_q \\ X'_d & r_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中： $\begin{bmatrix} r_a & -X'_q \\ X'_d & r_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_a & -X'_q \\ X'_q & r_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ X'_d - X'_q & 0 \end{bmatrix}$ 。

将（2）式整理为：

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_a & -X'_q \\ X'_q & r_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \\ &\quad - \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ X'_d - X'_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

其中： $E'_{qa} = E'_q - (X'_d - X'_q)I_d$ (4)

则（2）式可表示成：

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_{qa} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_a & -X'_q \\ X'_q & r_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

令， $T = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix}$ ， 其中 δ 为第 i 台机组的转子角，这里指机组 i 的转子

在同步坐标轴上的角度。

将（5）式左乘转换矩阵 T ：

$$T^* \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = T^* \begin{bmatrix} E'_d \\ E'_{qa} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_a & -X'_q \\ X'_q & r_a \end{bmatrix} T^* \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

由（6）式可得 xy 同步坐标系的电压方程：

$$\begin{bmatrix} U_x \\ U_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_{ax} \\ E'_{ay} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_a & -X'_q \\ X'_q & r_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

（7）式写成复数形式：

$$\dot{U} = \dot{E}_a - Z_a \dot{I} \quad (8)$$

下式为： n 节点的电网节点电压方程。

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

为不失一般性，设式（8）所描写的机组接于网络第 i 个节点，将（8）代入（9）中

第 i 个方程，消去 $\dot{U}_i$ ，可得如下网络方程。

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_{a1} - Z_{a1} \times \dot{I}_1 \\ \dot{E}_{a2} - Z_{a2} \times \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{E}_{an} - Z_{an} \times \dot{I}_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

上式整理成为：

$$\begin{aligned} & \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{a1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Z_{a2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Z_{an} \end{bmatrix} \right) \\ & * \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}_{a1} \\ \dot{E}_{a2} \\ \vdots \\ \dot{E}_{an} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{上式简写成：} \quad Z_f \dot{I} = Y \dot{E}_a \quad (12)$$

$$Z_f = \begin{bmatrix} Y_{11}Z_{a1} + 1 & Y_{12}Z_{a2} & \cdots & Y_{1n}Z_{an} \\ Y_{21}Z_{a1} & Y_{22}Z_{a2} + 1 & \cdots & Y_{2n}Z_{an} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ Y_{n1}Z_{a1} & Y_{n2}Z_{a2} & \cdots & Y_{nn}Z_{an} + 1 \end{bmatrix}$$

其中，

$$\text{由（12）式可得：} \quad \dot{I} = Z_f^{-1} * Y * \dot{E}_a \quad (13)$$

$$\dot{I} = Y_{eq} * \dot{E}_a \quad (14)$$

$$\text{其中，} \quad Y_{eq} = Z_f^{-1} * Y。$$

（14）式即为电网仿真模型的表达式，在电站系统机电暂态仿真模型的交替求解

中，该模型的作用是输入预估的定子绕组虚拟电势 $\dot{E}_a$ ，输出电网发电机节点注入电流 $\dot{I}$ 。当网络拓扑未发生变化时，每时步的计算中 Y_{eq} 无需计算，所以电网仿真模型的计算量在每时步的计算中大大降低。

1.2.2 发电机组仿真模型

1.2.2.1 同步电机数学模型

如（15）式所示，此模型的作用是输入励磁电动势 E_f 、以及机端电流 I_d 、 I_q ，输出同步坐标系下的定子绕组电势 E'_d 、 E'_q 。

$$\begin{cases} T'_{d0} p E'_q = E_f - E'_q - (X_d - X'_d) I_d \\ T'_{q0} p E'_d = -E'_d + (X_q - X'_q) I_q \end{cases} \quad (15)$$

1.2.2.2 励磁系统数学模型：

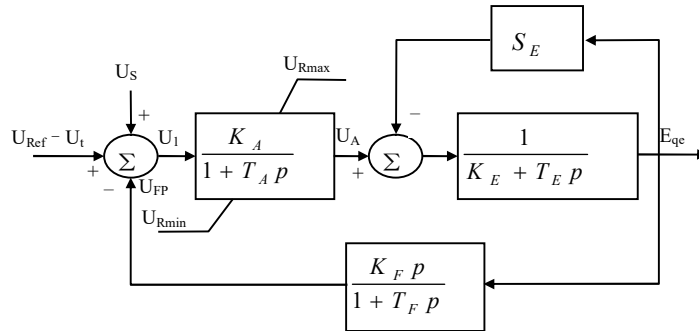


图 2 I 型励磁系统传递函数框图

如（16）式所示：

$$\begin{cases} (U_{Ref} - U_t) - U_{FP} = U_1 \\ U_1 * \frac{K_A}{1 + T_A * p} = U_A \\ (U_A - S_E * E_{qe}) \frac{1}{K_E + T_E * p} = E_{qe} \\ E_{qe} * \frac{K_F * p}{1 + T_F * p} = U_{FP} \end{cases} \quad (16)$$

该模型的作用是输入机端电压 U_t ，输出励磁电动势 E_f 。其中机端电压 U_t 可根据（7）式和（17）式求取：

$$U_t = \sqrt{U_x U_x + U_y U_y} \quad (17)$$

1.2.2.3 水轮机及调速系统模型:

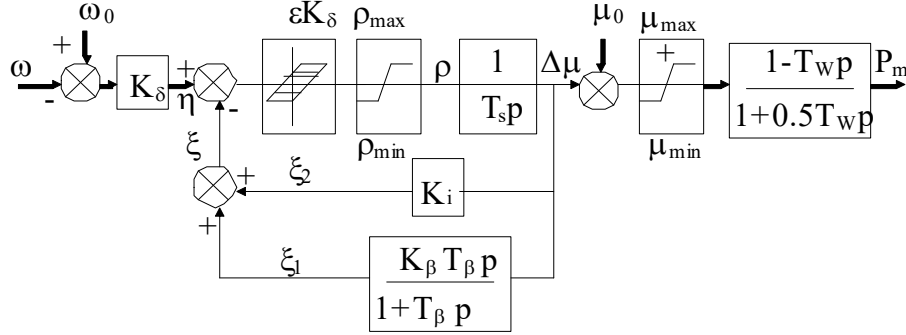


图3 水轮机及其调速系统传递函数框图

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\delta}(\omega_0 - \omega) = \eta \\ \eta - \xi = \rho \\ \xi = K_i \Delta u + \frac{K_{\beta} T_{\beta} p}{1 + T_{\beta} p} \Delta u \\ \frac{\rho}{T_s p} = \Delta u \\ \Delta u = u - u_0 \\ u * \frac{1 - T_{\omega} * p}{1 + 0.5 * T_{\omega} * p} = \frac{T_m}{K_{mH}} \\ T_J * \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D * \omega \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_n \end{array} \right. \quad (18)$$

该模型的作用是输入机端电磁力矩 T_e 、调速系统控制变量 u_0 或 ω_0 ，输出转子角频率 ω 、转子角 δ 。

1.2.2.4 水力系统模型:

详细水力系统的模型可以在水轮机及其调速系统模块中考虑，这样做的好处是，即便考虑了详细水力系统的水轮机及其调速系统的模型比较复杂，但由于发电机组和电网是交替求解计算，即便电网规模较大也不会产生“维数灾”。

1.2.3 辅机系统:

辅机系统主要表现为各种电机负荷的运行特性，和电站主系统是弱耦合，辅机系

统以非闭环的方式参与到系统仿真模型的计算中。

1.2.5 监控和保护：

由于监控及保护和系统仿真模型的计算中是解耦的，因此监控和保护在系统仿真模型计算中的作用就是获取数据，输出断路器分合命令或机组功率增减命令或调压命令等。

1.3 交替求解计算（闭环计算）

以本时步 dq 轴电压值为已知量，按照（4）～（14）式得到电网仿真模型的计算式，当满足收敛条件时，进行下一时步的计算。机网交替求解流程图见图 2 所示。

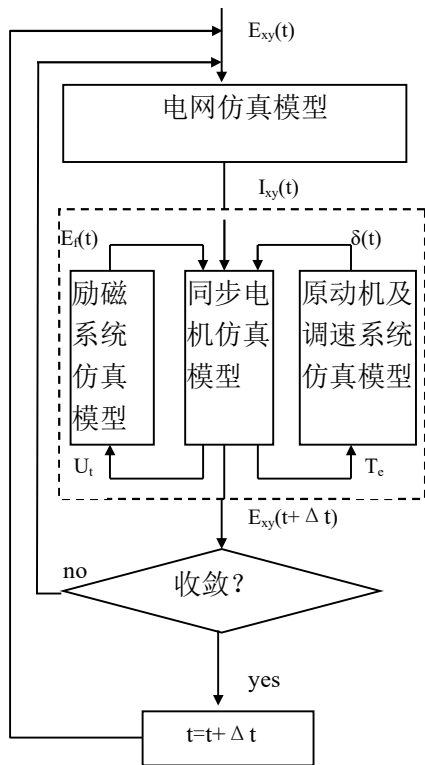


图 4 电网、发电机组仿真模型交替求解计算流程图

电站系统机电暂态仿真模型的交替求解计算过程见图 4 所示。

- （1）发电机组内部交替计算直至收敛；
- （2）电网和发电机组交替计算直至收敛；
- （3）、令 $t=t+\Delta t$ ，相应各状态量 t 时刻的值替换为 $t+\Delta t$ 时刻的值，重复（1）～（3）进行下一时步的计算。

1.4 仿真实验

以下图所示某电站系统为例进行仿真实验来说明实验结果的有效性。

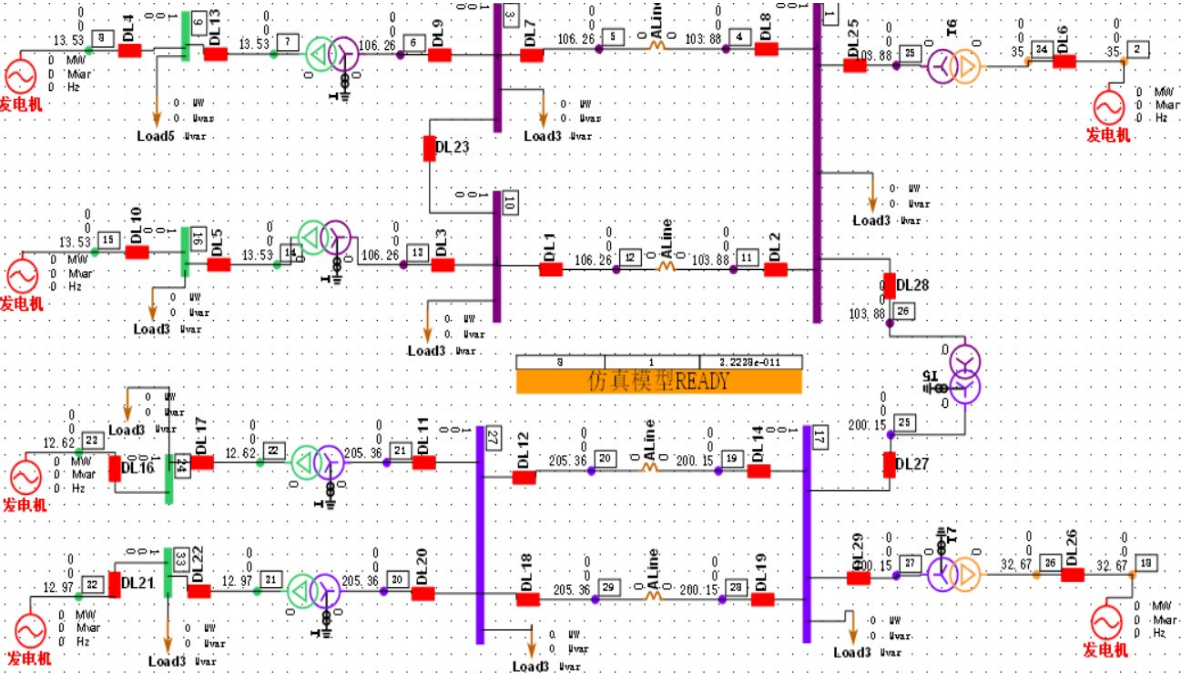


图 5：某电站系统单线图

实验一：

$t=0.2$ 秒时发生三相短路故障，机 1-机 2 间的功角曲线及机 1 的有功功率变化曲线，如图 6 图 7 所示。

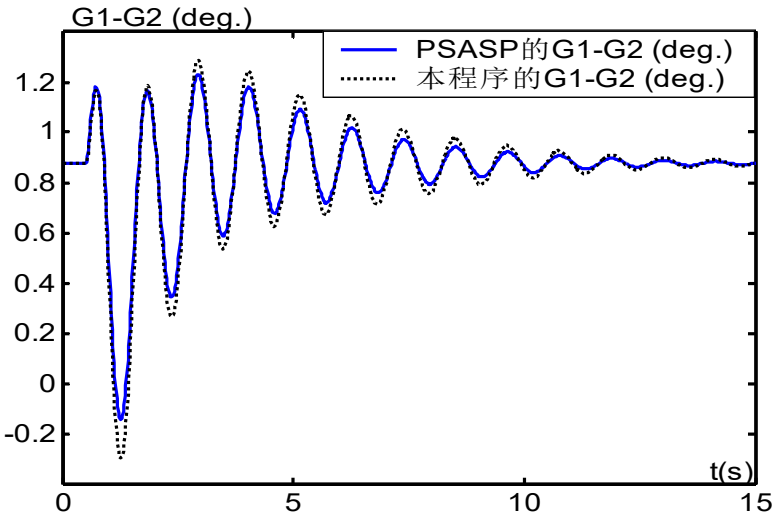


图 6 机 1-机 2 间的 $\delta(t)$ 曲线

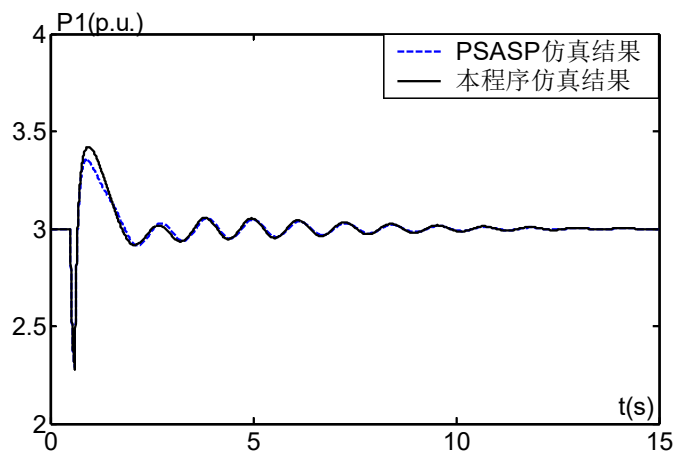


图 7 机 1 的 $P(t)$ 曲线

实验二：

机组 75%甩负荷时水轮机调速系统的动态特性实验及对比如图 8 图 9 所示。

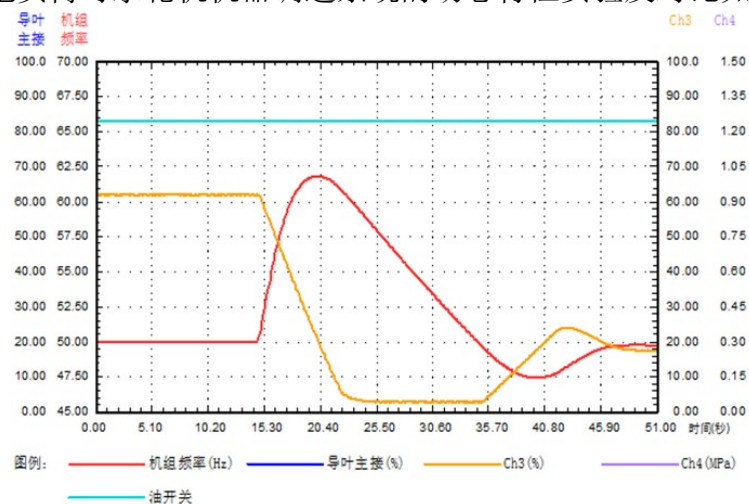


图 8 TG2000d 水轮机调速器和机组录波图

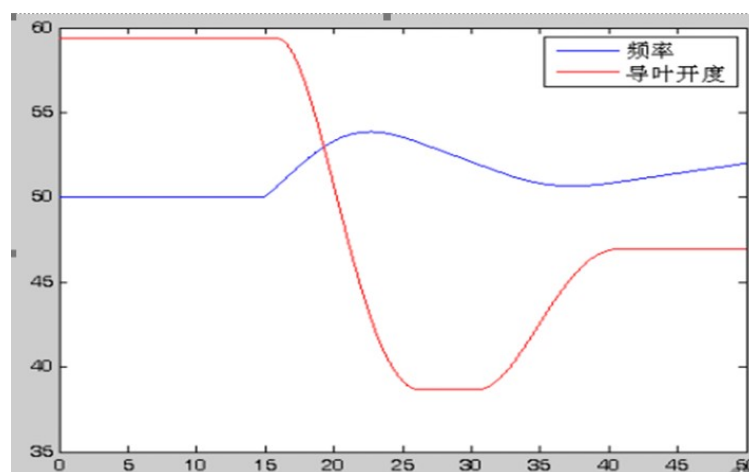


图 9 为本仿真平台试验甩负荷 75%仿真图

实验三：

阶跃负荷时发电机机械功率和电磁功率及频率的动态变化情况，如图 10 所示。

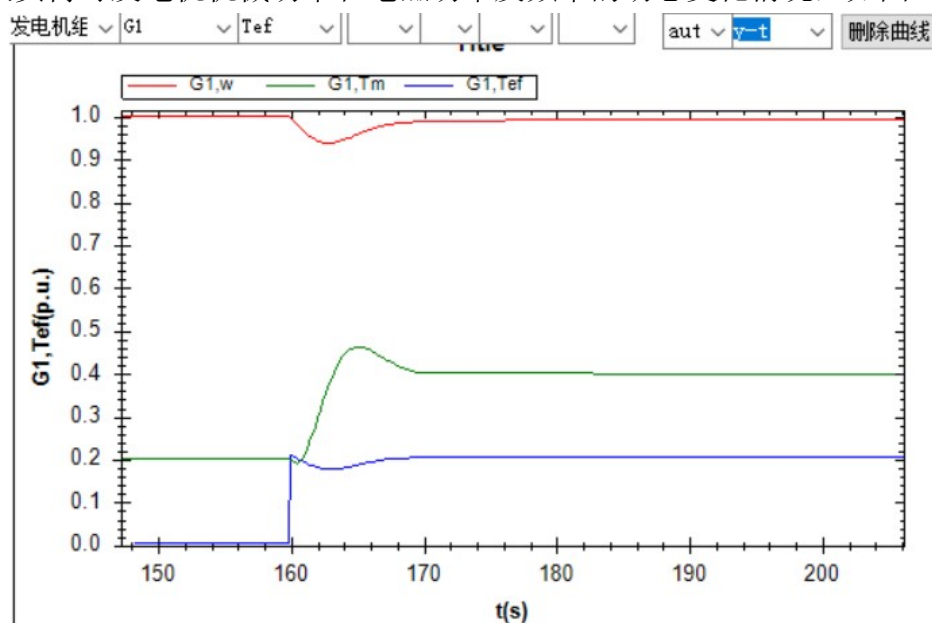


图 10 阶跃负荷时发电机机械功率、电磁功率及频率的动态变化

实验四：发电机出口断路器并列合闸时发电机机械功率和电磁功率的功率平衡动态过程变化过程如图 11 所示。

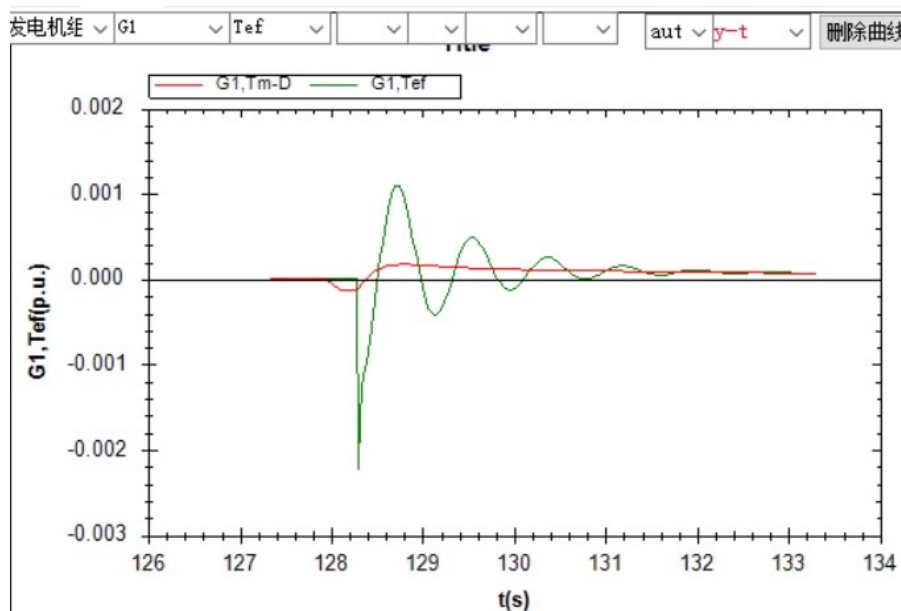


图 11 同步过程中发电机的功率振荡平衡过程

1.5 小结

本章介绍了仿真实验平台的水电站电力系统的主要元件：水轮机及其调速系统，励磁系统，同步发电机，输电网络的数学模型，采用隐式梯形积分法处理上述元件的微分方程，说明了构造水轮机及其调速系统模块化模型、励磁系统模块化模型、同步

发电机模块化模型和电网模块化模型的方法，并给出了各模块的框图及计算流程图。

1.6 附录：WDT-III 所示的电力系统的相关参数，系统基准容量为 100MVA

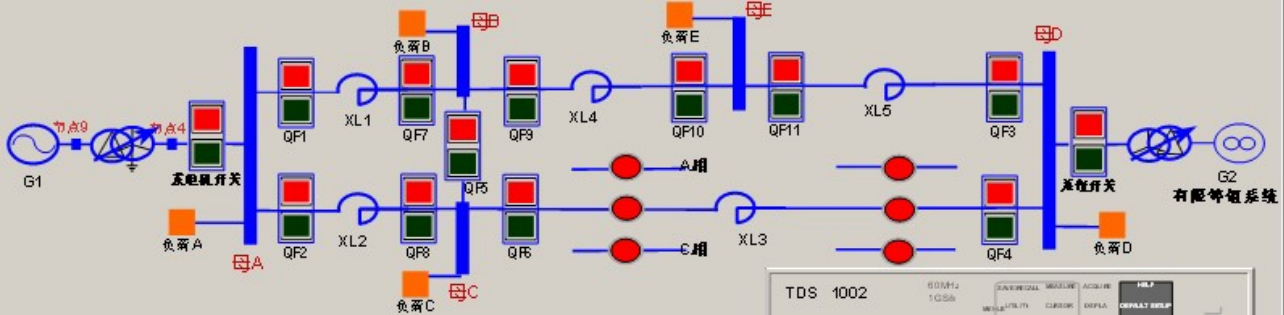


图 12 本仿真平台中的 WDT-III 所示的电力系统

G1 参数

名 称	符 号	单 位	G1
型 号			TS854/156 - 40
额定容量	S 额	KVA	100000
额定出力	P 额	KW	85000
额定电压	U 额	KV	13.8
额定电流	I 额	KA	4.1837
功率因数	cos		0.85
额定频率	F 额	HZ	50
额定转速	N 额	r/min	150
飞逸转速	N 额	r/min	290
转动方向			顺时针
磁极数	2p	个	40
相数	m	相	3
定子接法			2Y
额定励磁电流		KA	1.340
短路比			1.127
零序电抗	X ₀		0.1451
负序电抗	X ₂		0.2623
纵轴暂态电抗	X' _a		0.348
纵轴次暂态电抗	X'' _a		0.2659
横轴暂态电抗	X' _q		0.675
横轴次暂态电抗	X'' _q		0.268
定子开路纵轴暂态时间常数	T' _{ao}		6.4
定子开路纵轴次暂态时间常数	T'' _{ao}		0.36
定子绕组直流分量衰减时间常数	T _a		0.275

名 称	符 号	单 位	G1
定子漏电抗	X_s		0.1498
纵轴同步电抗	X_a		0.5695
横轴同步电抗	X_q		0.3513
转动惯量		T/m^2	11000

SSP11—100000/110 型主变压器,为单机单变单元接线的升压变压器

序号	名称	单位	规格
1	型 号		SSP11—100000/110
2	相数	相	3
3	频率	HZ	50
4	电压	KV	$121 \pm 2 \times 2.5\% / 13.8$
5	容量	KVA	100000
6	接线组别		Y0/ Δ —11
7	空载电流	%	0.06
8	空载损耗	KW	48
9	短路损耗	KW	324.94
10	阻抗电压	%	10.5
11	中性点接线方式		直接接地

典型 I 型励磁系统参数值

参数符号	参数值	参数符号	参数值
K_A	400	$S_{E\max}$	0.86
T_A	0.02s	$S_{E0.35\max}$	0.5
K_E	1.0	$U_{R\max}$	7.3
T_E	0.8s	$U_{R\min}$	-7.3
K_F	0.03	$E_{q\max}$	3.9
T_F	1.0s	$E_{q\min}$	0

典型的水轮机调速器参数值		典型的汽轮机调速器参数值	
参数符号	参数值	参数符号	参数值
$\delta = 1/K_\delta$	0.05~0.1	$\delta = 1/K_\delta$	0.03~0.06

ε	0.1%~0.7%	ε	0.1%~0.5%
T_S	4~7s	T_S	0.1~0.5s
δi	0.03~0.06	δi	0.03~0.06
K_i	$\delta i/\delta$	K_i	1
β	0~0.6s	T_{CH}	0.4s
K_β	β/δ	T_{RH}	4~11s
T_β	2.5~10s	α	0.2~0.3
T_ω	0.5~5s		

输电线路参数值

序号	参数符号	阻抗(Ω)	备注
1	XL1	1.57+5.47i	仿真系统中，输电线路的 I 侧和 J 侧（始端和末端），是随机确定的。因此输电线路始末端功率的正负号和功率方向的关系要根据实际情况分析确定。
2	XL2	5+15i	
3	XL3	1.57+5.47i	
4	XL4	2.5+7.5i	
5	XL5	2.5+7.5i	