

文章编号:1000-582X(2006)02-0054-03

汽轮机系统对电力系统低频振荡的影响*

牟小松¹, 成涛², 林莉¹, 牟道槐¹

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400030; 2. 重庆电力公司, 重庆 400001)

摘要: 电力系统低频振荡是电力工作者非常关注的问题, 过去所作的研究大多忽略了原动机系统特性的影响. 文章给出了汽轮机系统以及电力系统各个部分的数学模型, 计算了各种情况下相应的特征值, 通过对比结果分析了汽轮机系统对电力系统低频振荡的影响.

关键词: 低频振荡; 汽轮机系统; 特征根

中图分类号: TM744

文献标识码: A

在分析电力系统低频振荡时, 一般将汽轮机的功率等值为恒定的机械功率, 这样原动机系统对电力系统低频振荡的影响就被忽略. 这种忽略能否真实地反映电力系统的实际情况是一个值得研究的问题.

采用3种汽轮机系统模型: 恒定机械功率模型、机械功率变化量恒定模型以及简化的汽轮机模型^[1], 针对3种模型建立系统的状态方程, 对电力系统低频振荡进行的研究和对比分析, 说明了原动机系统对电力系统低频振荡的影响.

1 数学模型

1.1 发电机数学模型

发电机模型采用考虑暂态电势 E'_q 变化的 Phillips - Heffron 模型^[2], 用三阶的代数方程表示为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \delta &= \omega_0 \Delta \omega \\ T_J \Delta \dot{\omega} &= \Delta P_m - \Delta P_e - D \Delta \omega \\ K_3 T'_{d0} \Delta E'_q &= K_3 \Delta E_{fd} - K_3 K_4 \Delta \delta - \Delta E'_q \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

式中, $\Delta \delta$ 和 $\Delta \omega$ 分别为转子的位置角和角速度增量; $\Delta E'_q$ 和 ΔE_{fd} 分别为 q 轴次暂态电势和励磁电势的增量; ΔP_m 、 ΔP_e 分别为机械功率和电磁功率的增量; T_J 、 T'_{d0} 分别为机组惯性时间常数和 d 轴开路暂态时间常数; D 为阻尼系数.

1.2 汽轮机系统数学模型

图1示出了非再热式汽轮机系统数学模型, 其中 P_{GV} 为进汽功率, P_m 为机械输出功率.

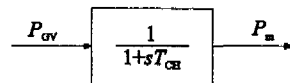


图1 非再热式汽轮机模型图

其传递函数为:

$$G_T(s) = \frac{P_m(s)}{P_{GV}(s)} = \frac{1}{1 + sT_{CH}} \quad (2)$$

其中, 时间常数 T_{CH} 表示由汽室和进气口管道所产生的延时, 一般 $T_{CH} = 0.2 \sim 0.5$ s, 取 $T_{CH} = 0.5$ s;

图2示出了串级组合单再热模型.

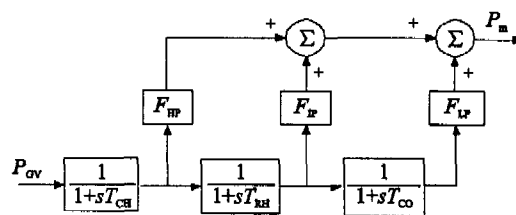


图2 串级组合单再热模型图

其传递函数为:

$$G_T(s) = \frac{P_m}{P_{GV}} = \frac{F_{LP} + F_{IP}(1 + sT_{CO}) + F_{HP}(1 + sT_{RH})(1 + sT_{CO})}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})(1 + sT_{CO})} \quad (3)$$

* 收稿日期: 2005-08-27

作者简介: 牟小松(1980-), 男, 山东烟台人, 重庆大学硕士研究生, 主要从事电力系统及其自动化方向的研究.

式中,时间常数 T_{CH} , T_{RH} 和 T_{CO} 相应的表示由汽室和进气管道、再热器以及交叉管系所产生的延时, F_{HP} , F_{IP} 和 F_{LP} 表示在不同汽缸中所产生的汽轮机总功率中的部分,他们的典型参数值分别为 $T_{CH}=0.1\text{ s}$, $T_{RH}=5\text{ s}$, $T_{CO}=0.4\text{ s}$, $F_{HP}=0.3$, $F_{IP}=0.4$ 和 $F_{LP}=0.3$.

1.3 调速器数学模型

图3是调速系统的近似模型^[1].

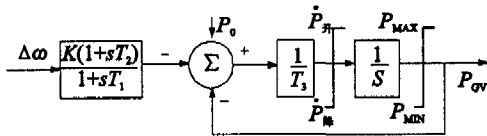


图3 调速系统的近似模型

当调速系统采用无气流反馈的电气液压时,时间常数 $T_1=T_2=0$,忽略 P_0 ,而且小扰动情况下限幅环节的作用很小,可以忽略,因而传递函数简化为:

$$G_C(s) = \frac{P_G V(s)}{\Delta\omega(s)} = -\frac{K}{1+sT_3} \quad (4)$$

式中, K 为调速系统总有效增益,正常情况下 $K=20\sim 100$,在文中的计算中 $K=50$; T_3 为时间常数,取 $T_3=0.1\text{ s}$.

1.4 励磁系统数学模型

采用快速励磁系统,其传递函数为:

$$\frac{\Delta E_{fd}}{-\Delta U} = \frac{K_e}{1+sT_e} \quad (5)$$

$$\Delta U = K_5 \Delta\delta + K_6 \Delta E'_q \quad (6)$$

式中, ΔU 为机端电压的增量; K_e 为励磁系统增益; T_e 为励磁系统的时间常数.

2 汽轮机系统对电力系统低频振荡的影响

2.1 系统结构与参数

图4为单机无穷大系统,主要参数(时间常数单位为s,其他均为标么值)如下^[3]:

发电机: $x_q=1.0354$, $x_d=0.72$, $x'_d=0.36$, $\cos\varphi_0=0.85$, $T'_{\omega 0}=10.9\text{ s}$, $\omega_0=314$, $T_j=8.75\text{ s}$;

励磁系统: $K_e=200$, $T_e=0.03\text{ s}$;

线路: $R=0$, $X=0.413$;

阻尼系数: $D=6$; 取 $P=0.9$, $Q=0.2$ 为初始运行点, $\dot{U}_c=1.02$, $\dot{U}=1$.

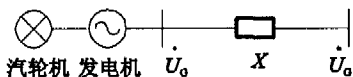


图4 单机无穷大系统

2.2 不同汽轮机模型下的状态方程^[4]

1) 不计调速器动作,即 $\Delta P_m=0$,取系统的状态变

量为 $[\Delta\delta \ \Delta\omega \ \Delta E'_q \ \Delta E_{fd}]'$,相应的系数矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{T_j} & -\frac{D}{T_j} & -\frac{K_2}{T_j} & 0 \\ -\frac{K_4}{T'_{\omega 0}} & 0 & -\frac{1}{K_3 T'_{\omega 0}} & \frac{1}{T'_{\omega 0}} \\ -\frac{K_5 K_6}{T_e} & 0 & -\frac{K_5 K_6}{T_e} & -\frac{1}{T_e} \end{bmatrix}$$

2) 采用非再热式模型,取系统的状态变量为

$[\Delta\delta \ \Delta\omega \ \Delta E'_q \ \Delta E_{fd} \ \Delta P_{GV} \ \Delta P_m]'$,系数矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{T_j} & -\frac{D}{T_j} & -\frac{K_2}{T_j} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_j} \\ -\frac{K_4}{T'_{\omega 0}} & 0 & -\frac{1}{K_3 T'_{\omega 0}} & \frac{1}{T'_{\omega 0}} & 0 & 0 \\ -\frac{K_5 K_6}{T_e} & 0 & -\frac{K_5 K_6}{T_e} & -\frac{1}{T_e} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K}{T_3} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_{CH}} & -\frac{1}{T_{CH}} \end{bmatrix}$$

3) 采用串级组合单再热模型,也可以写出此时的状态变量和系数矩阵.

2.3 不同汽轮机系统模型对应的特征根

根据2.2给出的汽轮机模型写出状态方程系数矩阵,计算相应的特征根(如表1)^[5].

表1 3种模型对应的特征根

模型	特征根		
	$\lambda_{1,2}$	$\lambda_{3,4}$	$\lambda_{5,6}$
不计调速器动作非再热简化模型	-17.008 4 ± j6.506 5	-0.315 6 ± j6.972 1	-8.927 0
串级组合再热模型	-16.973 3 ± j6.527 7	0.118 1 ± j6.476 0	-10.251 5 ± j3.250 2

由表1对以上3种模型对应特征根比较,可以很明显的看出:采用不同模型对特征根 $\lambda_{1,2}$ 几乎没有影响,而对 $\lambda_{3,4}$ 有一定的影响,对 $\lambda_{5,6}$ 的影响最大.

2.4 相关性分析

以汽轮机系统采用串级组合单再热简化模型为例,计算得到其特征根,其中有3个振荡模式.通过计算相关矩阵,分析特征根和各个状态变量的相关性(如表2)^[6].

表2 串级组合单再热简化模型的振荡模式

特征根	阻尼比	振荡频率/Hz	主要相关量	次要相关量
$\lambda_{1,2}$	0.933 4	1.038 9	$\Delta E'_q, \Delta E'_{fd}$	$\Delta\delta, \Delta\omega$
$\lambda_{3,4}$	-0.018 2	1.030 7	$\Delta\delta, \Delta\omega$	P_{cv}, P_m, h_1
$\lambda_{5,6}$	0.953 2	0.517 3	P_m, P_{cv}, h_1	$\Delta\omega$

从表2知道,与特征根 $\lambda_{1,2}$ 主相关的是励磁系统状态量 $\Delta E'_q, \Delta E'_{fd}$,与 $\Delta\delta, \Delta\omega$ 有一定的相关性,与其他状态变量的相关性非常小,因而考虑汽轮机与否,对 $\lambda_{1,2}$ 几乎没有影响;而与特征根 $\lambda_{3,4}$ 主相关的状态变量是发电机的运动角 $\Delta\delta$ 和角速度 $\Delta\omega$,次要相关的状态变量是 $\Delta P_{cv}, \Delta P_m, h_1$,因而采用3种不同模式, $\lambda_{3,4}$ 就有一定的变化但并不明显;对 $\lambda_{5,6}$ 来说,主要与之相关的状态量为汽轮机系统的状态量 h_1 和 P_m, P_{cv} ,因而采用3种不同模型加入汽轮机系统时,系统的行为有了很大的变化.这也验证了由表1直接观察得到的结论,可见在建立电力系统的模型时,有必要考虑到原动机系统如汽轮机系统的影响,否则就可能由于模型的不精确而导致计算结果产生较大误差.

4 结 论

针对以往忽略原动机系统的情况,在考虑汽轮机系统时,采用3种不同的模型列写了单机无穷大系统相应的状态方程及其系数矩阵,进行了具体的计算分析.得到结论:汽轮机系统的某些参数对电力系统振荡模式有很大影响,因而在进行电力系统低频振荡计算分析的时候,有必要计及原动机系统的影响.

参考文献:

- [1] 余贻鑫, 陈礼义. 电力系统的安全性和稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [2] 余耀南. 动态电力系统[M]. 北京: 水利水电出版社, 1985.
- [3] 陈于信. PSS在快速励磁系统中的应用以及仿真计算[J]. 江西电力职工大学学报, 1999, 12(3): 31-34.
- [4] 马大强. 电力系统机电暂态过程[M]. 北京: 水利水电出版社, 1988.
- [5] 吴天明. MATLAB电力系统设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [6] PRABHA KUNDER. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

Influence of Steam Turbine System on Low Frequency Oscillation

MU Xiao-song¹, CHENG Tao², LIN Li¹, MU Dao-huai¹

(1. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400001, China)

Abstract: Low frequency oscillation of electric power system is a problem which electric workers always care about. The influences of prime mover characteristics were ignored in the past research. The paper introduces the models of steam turbine system and each part of electric power system, and calculates the corresponding eigenvalues, then analyzes the influences of steam turbine system on low frequency oscillation.

Key words: low frequency oscillation; steam turbine system; eigenvalue

(编辑 陈移峰)