

电力系统频率动态过程仿真中 锅炉动态特性影响研究

施 翔¹, 刘洪波², 徐兴伟³, 穆 钢¹

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 华北电力大学 电气工程学院, 北京 102206; 3. 东北电网有限公司 电力调度通信中心, 辽宁 沈阳 110006)

摘要: 在对实际大区域电网进行频率动态过程的研究中发现, 仿真所得的频率轨迹与量测装置记录到的实测轨迹偏差较大。解释了轨迹偏差产生的原因和特点, 指出仿真系统中所采用的火电机组负荷调节系统模型中未考虑锅炉主蒸汽压力对频率动态过程的影响。根据分析, 在仿真系统中自定义了计及锅炉动态特性影响的机组负荷调节系统模型。考虑锅炉动态特性对发电机组输出功率的影响, 将模型中锅炉主蒸汽压力侧的影响等效为一阶惯性环节, 应用调整后的模型进行仿真计算。为使频率动态过程的仿真轨迹与实测轨迹相接近, 进一步修正了惯性环节中的时间常数。

关键词: 电力系统; 动态频率; 实测轨迹; 动态特性

中图分类号: TM 743

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)05-0069-04

0 引言

频率是电力系统运行质量和安全情况的重要指标之一^[1]。随着现代电力系统中电网容量的不断增大, 用户对电能质量的要求越来越高, 频率动态过程的研究也越来越被重视^[2]。

随着同步相量测量装置的出现, 国内外电力行业掀起了建立广域动态监测系统的热潮, 借助于此, 可以得到电力系统动态过程中部分变量的真实轨迹, 这些轨迹带有高精度的时标, 因而可以与数值仿真计算结果进行对比分析^[3-5], 并验证仿真系统元件或参数的准确度^[6-7]。

某实际电网于 2004 年 4 月 16 日和 4 月 26 日发生了 2 次功率脱落事件, 并通过系统中装设的频率量测装置记录了扰动发生前后电网频率的动态过程。对上述电网进行频率动态过程仿真, 发现仿真轨迹与实测轨迹有较大差别, 根据轨迹偏差特点发现原动机模型和参数的不准确是产生轨迹偏差的一个重要原因。而通过设定电网中发电机输出功率的上限值, 在频率动态过程仿真中计及锅炉动态特性的影响, 让电网中部分参与调频的发电机组退出一次调频, 都可以使仿真轨迹与实测轨迹相接近。

从锅炉动态特性对频率动态过程的影响进行研究: 首先对单元机组的负荷调节系统模型进行简化分析, 计及了锅炉动态特性的影响; 并将调整后的模型加入到原系统中进行仿真计算, 调整模型中的参数使仿真轨迹尽可能接近实测轨迹; 最后通过不同的实测算例验证了模型和参数调整是正确的。

1 仿真分析

频率量测装置可记录电力系统发生功率扰动时的频率动态过程, 同时由数据采集系统可以获得故障发生时系统的运行状况, 并根据实际中功率扰动的地点和程度设置扰动^[8], 经过仿真计算可获得系统的仿真轨迹, 从而可以在指定节点观测频率, 将仿真轨迹与实测轨迹相比较。

对某实际电网进行仿真分析, 主要研究当系统发生有功脱落时的频率动态过程, 仿真的条件如下: A 厂 4 号机跳闸, 脱落功率为 270 MW, 在母线 B 处记录系统频率轨迹。用 PSASP 程序进行仿真计算, 仿真时间为 35 s。结果如图 1 所示(1 为实测轨迹, 2 为仿真轨迹)。

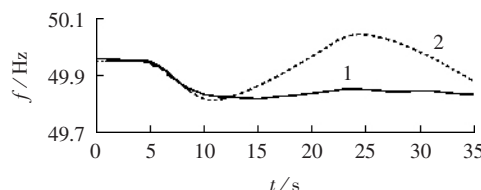


图 1 参数未调整时的仿真轨迹与实测轨迹的比较

Fig.1 Comparison between measured and simulated trajectories without parameter modification

从表 1 中给出的具体轨迹指标中可以看出: 仿真轨迹与实测轨迹到达最低点的幅度基本吻合, 但

表 1 实测轨迹与仿真轨迹的比较数据

Tab.1 Data comparison between measured and simulated trajectories

轨迹类型	初始频降/Hz	频降时间/s	回升最大频率/Hz
实测轨迹	49.82	13.8	49.85
仿真轨迹	49.81	11.4	50.05

到达最低点的时间略微超前,实测轨迹到达最低点后,频率回升比较缓慢,而仿真轨迹到达最低点后,频率回升较快,而且仿真轨迹的频率回升最高点与实测轨迹相差较大。

通过对仿真系统模型和参数的研究可以发现,仿真轨迹中第一摆回升幅度主要是由原动机模型中汽轮机的输出功率所决定的^[9],发电机组输出机械功率的数值越大,系统频率回升幅度就越高^[10]。所采用仿真软件 PSASP 中,对系统中所有汽轮发电机组的负荷调节系统都只采用了汽轮机及其调速系统模型^①,并没有考虑到锅炉主蒸汽压力的影响^[11]。

而在实际电力系统运行中,由于单元机组运行的自身特性,当系统发生大功率脱落时,机组在尽可能有较快功率响应的同时,要保证锅炉主蒸汽压力的稳定。实际单元机组运行是对输出功率与主蒸汽压力通过协调控制达到平衡与稳定。就单元机组的负荷控制而言,锅炉与汽轮发电机是不可分割的整体^[12]。因此,当计及锅炉主蒸汽压力影响时,汽轮机组的输出功率应该缓慢地变化,从而系统频率回升幅度也应该变缓慢。

因此,针对上述轨迹偏差分析,有必要对仿真计算中原有单元机组中的汽轮机及其调速系统模型进行调整,加入反映锅炉主蒸汽压力影响的模型。

2 数学模型分析

单元机组负荷调节系统模型有 2 个控制输入和 2 个输出对象^[13]: r_p 、 R_p 分别代表主蒸汽压力给定值、机组负荷要求指令; P_m 为实发功率, p_T 为主蒸汽压力。控制量中 μ_T 为汽机开度, μ_B 为锅炉燃料量,见图 2。

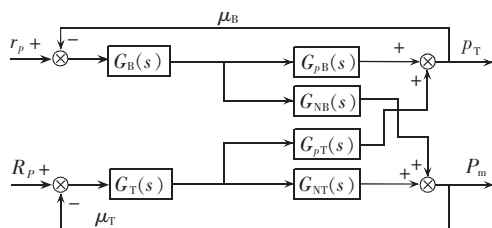


图 2 单元机组负荷调节系统方框图

Fig.2 Block diagram of unit load control system

图 2 中, P_m 调节和 p_T 调节 2 个系统彼此耦合,此处以汽轮发电机侧的负荷调节系统为主体进行研究,因此采用在 $G_B(s)$ 投入闭环运行条件下的方法对上图进行整定,图 2 可等效变换为图 3 所示^[14]。

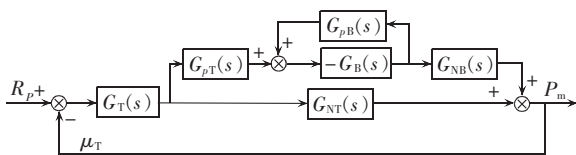


图 3 闭环整定后的单元机组负荷调节系统

Fig.3 Unit load control system after close-loop setting

可以令 $G_{Tr}(s)$ 相当于锅炉侧几个传递函数的等效对象,如式(1)所示。

$$G_{Tr}(s) = G_{NT}(s) - \frac{G_{pT}(s)G_B(s)G_{NB}(s)}{1 + G_B(s)G_{pB}(s)} \quad (1)$$

由于锅炉主蒸汽压力侧的传递函数较为复杂,为仿真研究方便,作如下简化:

$$G(s) = -\frac{1}{\tau s + 1} = -\frac{G_{pT}(s)G_B(s)G_{NB}(s)}{1 + G_B(s)G_{pB}(s)} \quad (2)$$

令式(2)为一阶惯性环节,如图 4 所示。

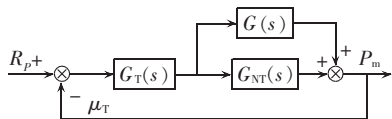


图 4 简化后的单元机组负荷调节系统

Fig.4 Unit load control system after simplification

图 4 所示的模型就是在原有汽轮机及其调速系统模型基础上加入了计及锅炉主蒸汽压力影响的简化一阶惯性环节。

根据上述所提及的实际电网运行的要求,对系统中汽轮机及其调速系统模型进行调整,加入了计及主蒸汽压力影响的一阶惯性环节,并通过更改时间常数 τ 的数值进行动态频率仿真,以找到合适的 τ 值,使仿真轨迹与实测轨迹接近。

3 模型调整后的仿真分析

3.1 仿真事件 1

对上述的某实际电网进行仿真计算,在原来初始条件的基础上,将 PSASP 数据库中单元机组的汽轮机及其调速系统模型修改为调整后的模型,分别取时间常数 τ 值为 10、15、20、25、30 s 进行仿真^[15],与实测轨迹进行比较,如图 5 所示(图中 0 为实测轨迹,1~5 分别对应于 $\tau = 10$ 、15、20、25、30 s 时仿真轨迹,图 6 同)。

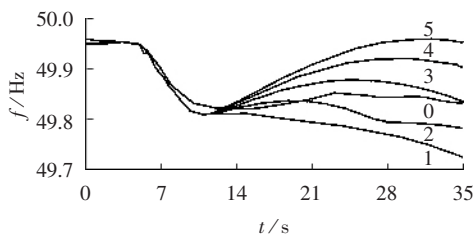


图 5 τ 不同值时的仿真轨迹与实测轨迹比较

Fig.5 Comparison between measured and simulated trajectories with different τ (case 1)

从图 5 中可以看出,将 τ 设为 10 s 和 30 s 时,2 条仿真轨迹与实测轨迹差距较大,而将 τ 设为 20 s 时,仿真轨迹与实测轨迹较为接近。并且, τ 值越大,系统频率的仿真轨迹向上爬升的坡度就越陡。

轨迹偏差的平均值表示仿真轨迹总体偏离实测轨迹的程度,平均值越大,偏离实测轨迹就越多;轨迹偏差的方差表示仿真轨迹与实测轨迹偏差的离散程度。而当有相同的轨迹偏差平均值时,方差值越小的,轨迹之间就越接近。

① 中国电力科学研究院. 电力系统分析综合程序用户手册, 2001.

从表 2 的各指标数据中可以得到:在仿真事件 1 中,时间常数设为 20 s 时,所对应的轨迹偏差的平均值和方差均最小。

表 2 时间常数 τ 不同取值时轨迹偏差数据
Tab.2 Trajectory errors with different τ (case 1)

τ /s	轨迹偏差平均值/Hz	轨迹偏差方差值/(Hz) ²
10	-0.0395	0.00125
15	-0.0184	0.00044
20	0.0105	0.00024
25	0.0320	0.00122
30	0.0470	0.00258

3.2 仿真事件 2

现在对上述某实际电网另一功率脱落事件进行仿真,仿真条件如下:C 厂 2 号机跳闸,脱落功率为 240 MW,在母线 B 处记录系统频率轨迹,分别取时间常数 τ 值为 10、15、20、25、30 s 进行仿真,结果如图 6 所示。

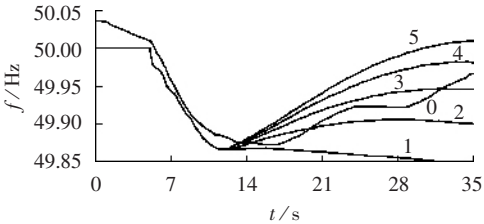


图 6 τ 不同值时的仿真轨迹与实测轨迹比较
Fig.6 Comparison between measured and simulated trajectories with different τ (case 2)

从图 6 中可以看出,当时间常数 τ 取值不同时,所得的仿真轨迹变化规律与图 5 相同。从表 3 的各指标数据中可以得到:在仿真事件 2 中,时间常数设为 20 s 时,所对应的轨迹偏差的平均值和方差均最小。

表 3 时间常数 τ 不同取值时轨迹偏差数据
Tab.3 Trajectory errors with different τ (case 2)

τ /s	轨迹偏差平均值/Hz	轨迹偏差方差值/(Hz) ²
10	-0.0409	0.00118
15	-0.0173	0.00031
20	-0.0006	0.00028
25	0.0118	0.00064
30	0.0207	0.00110

3.3 模型中参数的选取

为了找到符合上述 2 个事件中最优的时间常数,应用 Lagrange 插值方法对表 2 和表 3 的数据进行插值分析,分别求出 2 个事件中轨迹偏差的平均值最小时的时间常数。结果如表 4 所示。

表 4 事件 1 与事件 2 插值后的数据
Tab.4 Data after interpolation for in case 1 and case 2

仿真算例	τ /s	轨迹偏差平均值/Hz	轨迹偏差方差值/(Hz) ²
事件 1	15.9	0	0.00034
	26.0	0	0.00141
	20.1	0	0.00026
事件 2	21.7	0	0.00101
	24.3	0	0.00048

从表 4 中可以得到:在事件 1 中,当 τ 为 15.9 s 和 26.0 s 时,轨迹偏差平均值最小,而 15.9 s 时的轨迹偏差方差较 26.0 s 时的小,因此,事件 1 中将时间常数设为 15.9 s 时,仿真轨迹与实测轨迹偏差最小。同理,事件 2 中将时间常数设为 20.1 s 时,仿真与实测轨迹偏差最小。

综合 2 个事件分析结果,取上述 15.9 s 和 20.1 s 2 个数值的平均值得 $\tau=18$ s。并分别对 2 个事件进行仿真,与实测轨迹比较(如图 7 和图 8 所示),从而可以得到:将锅炉主蒸汽压力侧的一阶惯性环节的时间常数 τ 设为 18 s 时,所得的仿真轨迹与实测轨迹较为接近。

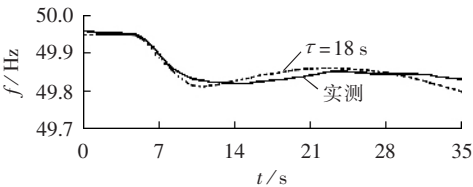


图 7 事件 1 中 τ 为 18 s 的仿真与实测轨迹比较
Fig.7 Comparison between measured and simulated trajectories with $\tau=18$ s(case 1)

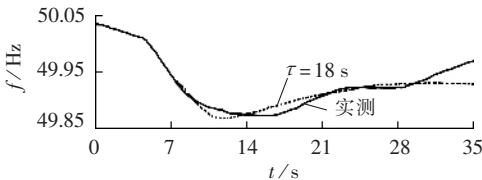


图 8 事件 2 中 τ 为 18 s 的仿真与实测轨迹比较
Fig.8 Comparison between measured and simulated trajectories with τ is 18 s(case 2)

4 结论

在实测频率轨迹基础上进行了动态频率仿真研究。基于原始模型参数仿真的动态频率轨迹与实测频率轨迹存在较大的偏差,从轨迹偏差分析发现考虑锅炉动态特性对系统频率的影响不容忽视。通过对原有汽轮机及其调速系统模型进行调整发现:加入一个简化锅炉主蒸汽压力侧的等效一阶惯性环节,并将其时间常数设为 18 s,可以使频率动态仿真轨迹与实测轨迹较为接近。采用基于实测轨迹调整系统模型和参数进行轨迹拟合的分析方法,在电力系统频率动态过程研究中取得了较好的效果。

参考文献:

[1] 蔡邕. 电力系统频率[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
[2] 王漪,王钢. 电力系统异步运行时频率动态过程的计算分析[J]. 电网技术,1994,18(3):35-38.
WANG Yi,WANG Gang. Calculation and analysis of frequency dynamics for power system in asynchronous status[J]. Power System Technology,1994,18(3):35-38.
[3] 常乃超,兰洲,甘德强,等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术,2005,29(10):46-52.
CHANG Nai - chao,LAN Zhou,GAN De - qiang,et al. A survey

- on applications of wide-area measurement system in power system analysis and control [J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 46-52.
- [4] 陈凤, 李欣然, 陈辉华, 等. 电动机模型结构与参数对暂态稳定仿真的影响[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(8): 29-33.
CHEN Feng, LI Xin-ran, CHEN Hui-hua, et al. Effect of induction motor model structure and parameters on simulating computation of electric power system transient stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(8): 29-33.
- [5] KOSZEREV D X, TAYLOR C W, MITTELSTADT W A. Model validation for the August 10 1996 WSCC system outage [J]. IEEE Trans on Power System, 1999, 14(3): 967-979.
- [6] 贺仁睦. 电力系统动态仿真准确度的探究[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 1-4.
HE Ren-mu. Research into veracity of power system dynamic simulation[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 1-4.
- [7] 高松, 贺仁睦, 马进, 等. 电力系统动态仿真误差评定准则研究[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 6-10.
GAO Song, HE Ren-mu, MA Jin, et al. Error criteria on power system dynamic simulation validation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 6-10.
- [8] 肖遥, 孟·让·柯洛德. 电力系统频率测量误差成因分析[J]. 电网技术, 2002, 26(1): 39-42.
XIAO Yao, MAUN J C. Analysis on error in power system frequency measurement [J]. Power System Technology, 2002, 26(1): 39-42.
- [9] 刘洪波, 穆钢, 徐兴伟. 使功-频过程仿真轨迹逼近实测轨迹的模型参数调整研究[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 20-24.
LIU Hong-bo, MU Gang, XU Xing-wei. Model parameter regulation to make simulated trajectory of power-frequency process draw near measured trajectory based on trajectory sensitivity[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 20-24.
- [10] 于达仁, 郭钰锋. 电网一次调频能力的在线估计[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 72-76.
YU Da-ren, GUO Yu-feng. The online estimate of prime frequency control ability in electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 72-76.
- [11] 汤涌, 宋新立, 刘文焯, 等. 电力系统全过程动态仿真中的长过程动态模型——电力系统全过程动态仿真软件开发之三[J]. 电网技术, 2002, 26(11): 20-25.
TANG Yong, SONG Xin-li, LIU Wen-zhuo, et al. Power system full dynamic simulation. Part III: long term dynamic models[J]. Power System Technology, 2002, 26(11): 20-25.
- [12] 王东风, 韩璞, 曾德良. 单元机组协调控制系统发展与现状[J]. 中国电力, 2002, 35(11): 69-73.
WANG Dong-feng, HAN Pu, ZENG De-liang. Development and present status of unit coordinated control system[J]. Electric Power, 2002, 35(11): 69-73.
- [13] 张文龙, 陈来九. 汽轮机采用功频调节系统时, 单元机组负荷反馈控制系统的分析和整定[J]. 中国电机工程学报, 1985, 5(3): 10-19.
ZHANG Wen-long, CHEN Lai-jiu. Analysis and tuning of generating unit load feedback control system, as turbine is equipped with power-frequency control system[J]. Proceedings of the CSEE, 1985, 5(3): 10-19.
- [14] 杨献勇. 热工过程自动控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [15] 刘洪波, 穆钢, 安军, 等. 基于 PSASP 的电力系统机辅分析软件的开发及其可视化实现[J]. 中国电力, 2006, 39(3): 90-94.
LIU Hong-bo, MU Gang, AN Jun, et al. Development of a power system CAA software and its visualization based on PSASP[J]. Electric Power, 2006, 39(3): 90-94.

(责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:



施翔

施翔(1982-), 男, 浙江金华人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统频率稳定性(E-mail: sx_1982@163.com);

刘洪波(1973-), 女, 吉林辽源人, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制;

徐兴伟(1971-), 男, 辽宁沈阳人, 高级工程师, 博士研究生, 从事电网调度及稳定计算工作;

穆钢(1957-), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士研究生导师, 从事电力系统分析与控制方面的研究和教学工作。

Study of impact of boiler's dynamic characteristics on dynamic frequency process in power system

SHI Xiang¹, LIU Hong-bo², XU Xing-wei³, MU Gang¹

(1. Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. Northeast Grid China Company Limited, Shenyang 110006, China)

Abstract: In the dynamic frequency process analysis of practical large power system, there are some evident errors between measured and simulated frequency trajectories. Its reason and characteristics are explained and it is pointed out that the impact of main steam pressure on dynamic frequency process is not considered in the unit load control model of simulation system. According to the analysis, the unit load control model based on the dynamic characteristics of boiler is built up in the simulation system. Considering the impact of boiler's dynamic characteristics on unit output power, its influence at the main steam pressure side is treated as a first-order inertial element in the model for calculation. In order to make the simulated trajectory of dynamic frequency approaching to the measured one, the time constant is further modified in the model.

Key words: power system; dynamic frequency; measured trajectory; dynamic characteristics