

汽轮机调速系统参数对电力系统阻尼特性的影响

王官宏, 黄 兴

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 建立了电力系统稳定计算用汽轮机及调速系统的数学模型并对其进行了适当的简化。频域分析和时域仿真表明, 不同参数配置下的汽轮机调速系统对电力系统的影响不一样, 它可能增加系统的阻尼, 也可能减小系统阻尼。放大倍数不改变系统的分界频率, 但阻尼大小、时间常数和纯延时等非线环节是影响分界频率的主要因素。汽轮机调速系统对电力系统阻尼特性的影响可以通过其提供的附加阻尼系数的符号和大小来确定。分界频率是判断调速系统阻尼特性的重要依据, 当振荡频率在分界频率附近时, 附加阻尼系数很小, 此时调速系统提供的附加阻尼接近于 0, 对系统的影响可忽略; 当振荡频率远离分界频率时, 需要考虑调速系统对电力系统阻尼的影响。对 3 机 9 节点系统进行小干扰分析和时域仿真, 结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 汽轮机调速系统; 分界频率; 阻尼特性; 电力系统

中图分类号: TM 311

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)04-0087-04

为构建坚强的电力系统, 确保系统安全稳定运行, 在电网的动态过程中应深入研究电力系统四大参数对系统稳定的影响^[1]。我国电力系统发展迅猛, 稳定问题日渐突出。为更好地开展大区域互联电网稳定性分析, 研究原动机调速系统对电力系统稳定性的影响十分必要^[2-3]。据调研发现, 当前我国原动机调速系统的动态特性、响应速度已经得到极大的提高, 在电力系统遭受扰动时, 有必要考虑调速系统的响应特性^[4-6]。1972 年加拿大的余耀南教授曾提出在水轮发电机组调速系统上装设调速器附加控制器(GPSS)平抑电力系统低频振荡, 这是可行的, 后来由于电力系统稳定器的迅猛发展, 这方面的发展中断了^[7]。目前快速灵敏的汽轮机调速系统对电力系统稳定性的影响已较为显著, 研究表明调速系统的参数选择不当会提供负阻尼恶化系统的低频振荡, 调速系统附加控制对电网频率稳定以及机组安全稳定运行具有很好的效果^[8-9]。

1 分析及稳定判据^[10]

研究电力系统元件对系统稳定特别是小干扰稳定性问题, 可以采用时域分析方法, 也可以采用频域分析方法。通过研究原动机调速系统主要参数对系统提供的附加阻尼系数及其对分界频率(boundary frequency)的影响, 可以获取待研究对象对系统影响的性质及大小。

2 汽轮机调速系统的模型及简化

典型的汽轮机调节器模型如图 1 所示, 该模型有 3 种基本调节方式, 即阀位控制、负荷回路控制及调节压力控制。

汽轮机调速系统的 PID 环节中, 比例放大倍数

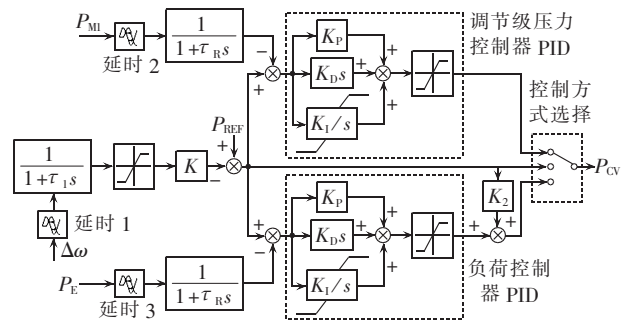


图 1 电液调速系统 (DEH) 控制系统模型

Fig.1 Model of DEH control system

一般在 0.1~2 之间, 积分时间常数一般大于 20 s, 微分环节一般退出运行, 图 1 模型可简化成一带延时的比例环节来表达。

典型的液压执行机构模型如图 2 所示。图中, v_{ELO} 为油动机超速开启系数; v_{ELC} 为油动机超速关闭系数; τ_c 为油动机关闭时间常数; τ_o 为油动机开启时间常数。

该模型将调门开度指令 P_{CV} 作为反馈信号构成闭环调节, 其中液压转换 PID 模块中 K_P 起主要作用, 积分、微分作用较小, 随着工艺的提高, 汽轮机调速系统液压部分的迟滞等非线性环节不突出, 该环节可以简化为带延时的一阶惯性环节来表达。

大机组基本为一次中间再热式汽轮机, 其模型

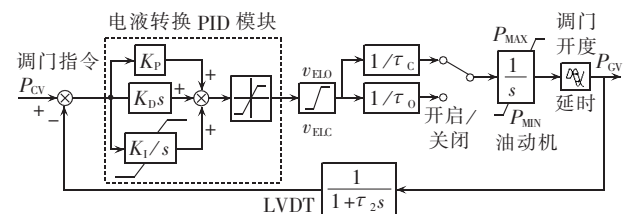


图 2 液压执行机构模型

Fig.2 Model of hydraulic actuator

框图如图 3 所示。图中, F_{HP} 为高压缸功率比例; F_{IP} 为中压缸功率比例; F_{LP} 为低压缸功率比例; τ_{CH} 、 τ_{RH} 、 τ_{CO} 为蒸汽容积时间常数。

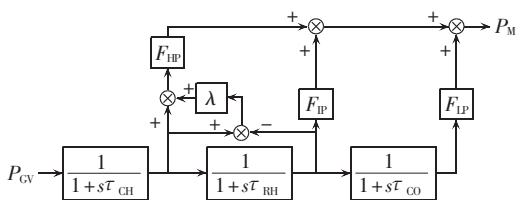


图 3 汽轮机模型

Fig.3 Model of turbine

理论及实测表明, τ_{RH} 远大于 τ_{CH} , 对于动态稳定所关心频率范围 (通常为 0.1~2.0 Hz) 的低频振荡, 将其简化为一个只考虑高压汽室容积时间常数的环节。简化模型的传递函数可用式 (1) 表示:

$$G(s) = -K_A \frac{1}{1 + \tau_g s} \frac{1}{1 + \tau_{CH} s} \quad (1)$$

其中, K_A 为放大倍数, τ_g 为液压系统时间常数, τ_{CH} 为高压汽室容积时间常数。

根据文献 [7] 可以得到调速系统的阻尼系数为

$$D_C = \frac{K_A (1 - \tau_g \tau_{CH} \omega^2)}{(1 - \tau_g \tau_{CH} \omega^2)^2 + (\tau_g + \tau_{CH})^2 \omega^2} \quad (2)$$

求解式 (2), 可以计算得到 $D_C=0$ 对应的频率 f_d , 称之为分界频率。

$$\omega_d = 2\pi f_d = \sqrt{1/(\tau_g \tau_{CH})} \quad (3)$$

3 调速系统主要参数系统稳定的影响研究

3.1 K_A 频率特性及对系统阻尼的影响

放大倍数 K_A 等于转速不等率的倒数, 以下分析汽轮机调速系统在不同放大倍数下的频率特性及其对阻尼系数和分界频率的影响。

取经典参数 $\tau_g = \tau_{CH} = 0.2$ s 不变, 放大倍数 K_A 分别为 16.7、22.2、33.3。计算得到该 3 组不同放大倍数下的相频曲线如图 4 所示 (图中, 曲线 1、2、3 分别表示 K_A 为 16.7、22.2、33.3 时的曲线; 后同)。

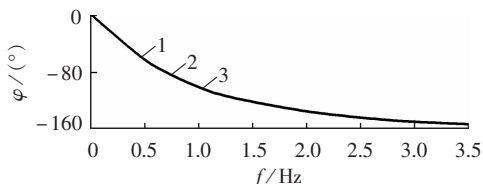


图 4 不同 K_A 下相频特性

Fig.4 Phase-frequency characteristic curve for different K_A

由图可见, K_A 的变化不影响调速系统的相频特性, 单独改变 K_A , 不会对分界频率产生影响。当 K_A 分别取 33.3、22.2、16.7 这 3 组参数时, 调速系统的分界频率均为 $f_d = 0.8$ Hz (每 0.1 Hz 取 1 点), 图 5 为汽轮机调速系统提供的附加阻尼特性 (标么值) 曲线。

结果表明, 附加阻尼系数 (D_C) 的过零点是相同的, 在正阻尼区域 ($D_C > 0$) 放大倍数越大, 正的附加

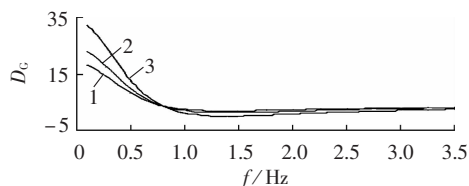


图 5 不同 K_A 下附加阻尼特性

Fig.5 Characteristic curve of added damping for different K_A

阻尼越大, 给系统提供的正阻尼越大; 负阻尼区域 ($D_C < 0$), 放大倍数越大, 附加阻尼的绝对值越大, 给系统带来的负阻尼也越多。放大倍数只改变系统阻尼的大小, 不改变系统分界频率。

3.2 τ_g 及 τ_{CH} 频率特性及对系统阻尼的影响

本节考虑了 3 组不同 τ_g 配置下的频率响应特性。取 $K_A = 22.2$ 、 $\tau_{CH} = 0.2$ s 不变, τ_g 分别为 0.02 s、0.2 s、1 s, 该 3 组参数下调速系统频率特性见图 6。

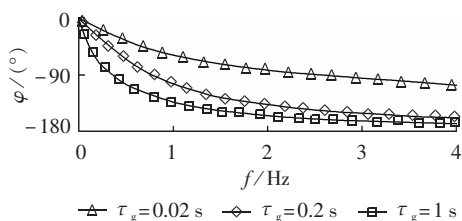


图 6 不同 τ_g 下相频特性

Fig.6 Phase-frequency characteristic curves for different τ_g

随着振荡频率的增大, 调速系统相位滞后加大, 当参数 τ_g 由小到大变化时, 系统的滞后角度具有相同的变化趋势, 具有单调性。但不同参数同一振荡频率下调速系统的滞后特性有较大的差异。

不同参数下调速系统的阻尼特性曲线如图 7 所示。这 3 组参数对应的分界频率分别为 0.36 Hz、0.80 Hz、2.50 Hz。

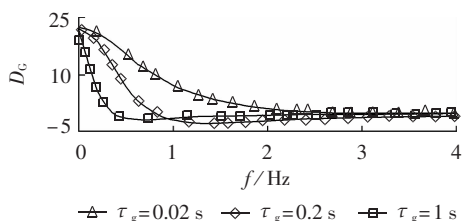


图 7 不同 τ_g 下附加阻尼特性

Fig.7 Characteristic curves of added damping for different τ_g

τ_g 的变化将显著影响调速系统的幅频及相频特性以及阻尼特性。随着 τ_g 的变大, 系统的分界频率逐步降低。当振荡频率低于分界频率时, 调速系统提供正阻尼; 当振荡频率高于分界频率时, 系统提供负阻尼。不同的 τ_g 配置对分界频率的影响比较大。

在物理意义上, τ_{CH} 是指汽轮机高压蒸汽管道容积时间常数, 简化模型中, 仅考虑了一个高压缸做功的情况。 τ_{CH} 的大小直接关系着高压缸出力的变化。与 τ_{CH} 相关的传递函数模型为 $1/(1 + \tau_{CH} s)$, 该模型

与 $1/(1 + \tau_g s)$ 具有相同的形式, τ_{CH} 对系统阻尼的影响分析与 τ_g 对系统的影响相同,不同的是 2 个参数的取值范围有差异。

当振荡频率在分界频率附近时,附加阻尼系数 D_C 很小,此时调速系统提供的附加阻尼接近于 0,对系统的影响较小。

3.3 非线性环节对系统阻尼的影响

汽轮机调速系统的非线性环节主要有死区、纯延时、限幅等。它们对调速系统的频率特性及阻尼特性均有影响,以纯延时环节的影响为大。

纯延时环节可以用式(4)表示:

$$G_{\text{delay}}(s) = e^{-\tau s} \quad (4)$$

其中, τ 为延时时间常数,根据计算得知,对于频率 1.0 Hz 左右的振荡,纯延时环节引起的相位滞后为 72° ,该环节对分界频率有很大的影响,考虑原动机调速系统对电力系统稳定的影响时,纯延时环节是不能忽视的。

4 小干扰分析和时域仿真计算^[11-13]

仿真工具为电力系统仿真计算软件 PSD-BPA,在 IEEE 90 系统框架上进行时域仿真以及小干扰分析,故障类型为 1 号发电机对应线路侧三相瞬时短路故障。研究的 3 机系统的故障类型相同,采用相同的原动机调速系统模型参数,计算中采用了六绕组发电机模型、数字式电液调速系统及自并励励磁系统,励磁系统及调速系统采用实测参数,发电机参数部分采用设计值。

在图 8 模型基础上研究原动机调速系统主要参数对阻尼特性的影响,篇幅所限,只列出不同放大倍数下的小干扰计算结果和时域仿真曲线。频域计算采用 BPA-SSAP 小干扰程序计算特征值及特性向量,时域仿真分析包含不考虑调速系统和考虑 2 组不同放大倍数下调速系统在故障下的发电机功角(1 号发电机为参考机)及有功功率振荡曲线, K_A 分别取 33.3、16.7。一个 n 机系统对应应有 $n-1$ 个机电振荡模式;对于 3 机系统,相应地有 2 个机电振荡模

式,这 2 个模式的特征值计算结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 负阻尼区域特征值计算结果

Tab.1 Calculated eigenvalues of negative damping area

K_A	模式	实部	虚部	频率/Hz	阻尼比
无调速	1	-0.8065	8.4854	1.3505	0.0946
	2	-0.7321	7.0120	1.1160	0.1038
16.7	1	-0.6933	8.5770	1.3651	0.0806
	2	-0.6568	7.1097	1.1315	0.0920
33.3	1	-0.5845	8.6653	1.3791	0.0673
	2	-0.5839	7.2026	1.1463	0.0808

表 2 正阻尼区域特征值计算结果

Tab.2 Calculated eigenvalues of positive damping area

K_A	模式	实部	虚部	频率/Hz	阻尼比
无调速	1	-0.4710	2.0840	0.3317	0.2204
	2	-0.5538	2.3712	0.3774	0.2274
16.7	1	-0.4938	2.1195	0.3373	0.2269
	2	-0.5808	2.4346	0.3875	0.2321
33.3	1	-0.5153	2.1558	0.3431	0.2325
	2	-0.6046	2.5007	0.3980	0.2350

表 1 中,放大倍数 $K_A=16.7$ 时,相比于无调速系统,阻尼比分别降低 0.014 0 和 0.011 8; $K_A=33.3$ 时,阻尼比分别降低 0.027 3 和 0.023 0,调速系统给系统提供的是负阻尼,随着放大倍数的增大,提供的负阻尼越多。表 2 中,放大倍数 $K_A=16.7$ 时,相比于无调速系统,阻尼比分别提高了 0.006 5 和 0.004 7; $K_A=33.3$ 时,阻尼比分别提高 0.012 1 和 0.007 6,调速系统给系统提供的是正阻尼,随着放大倍数的增大,提供的正阻尼越多。

对应地,时域仿真中发电机 2 的功角摇摆曲线如图 9、10 所示(图中,曲线 1、2、3 分别表示无调速、 $K_A=16.7$ 、 $K_A=33.3$ 这 3 种情况下的仿真曲线)。

频域小干扰计算结果与时域分析结论吻合。多机系统研究还表明,调速系统对电力系统动态稳定的影响与机组对某个振荡模式的相关程度有关。

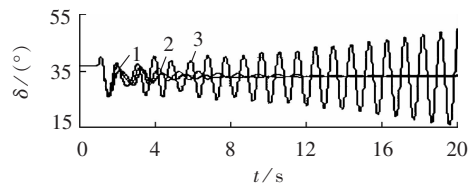


图 9 负阻尼区域的时域仿真曲线
Fig.9 Time-domain simulative curves of negative damping area

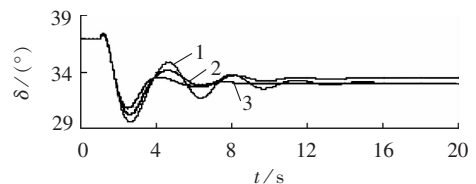


图 10 正阻尼区域的时域仿真曲线
Fig.10 Time-domain simulative curves of positive damping area

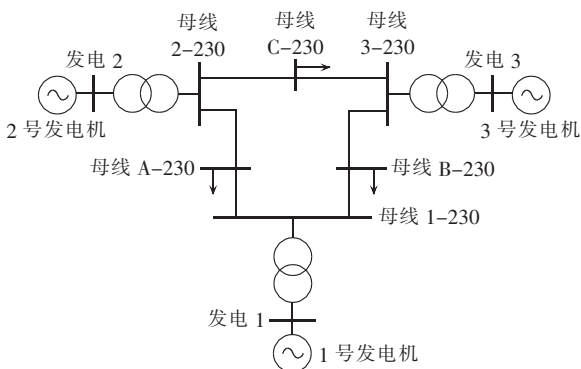


图 8 3 机 9 节点系统示意图

Fig.8 Three-machine nine-bus power system

5 结论

汽轮机调速系统对电力系统的阻尼特性有较为显著的影响。不同参数配置下的汽轮机调速系统对电力系统的影响不一样,它可能增加系统的阻尼,也可能减小系统阻尼。汽轮机调速系统对电力系统阻尼的影响可以通过调速系统提供的附加阻尼系数的正负或其提供的机械转矩在稳定计算坐标系中所处的位置确定,同时,分界频率是判断调速系统给电力系统提供正阻尼、负阻尼或者零阻尼的重要依据。通过频率、时域分析及联网计算表明,本文方法可应用于基于详细模型的调速系统对复杂电力系统的阻尼特性分析。

参考文献:

- [1] 国家电力调度通信中心,中国电力科学研究院,华中电网有限公司. 跨大区互联网低频振荡机理分析及控制策略的研究[R]. 北京:中国电力科学研究院出版科,2007.
- [2] 竺炜,唐颖杰,谭喜意,等. 发电机调速附加控制对系统频率稳定的作用[J]. 电力自动化设备,2008,28(12):21-24.
ZHU Wei,TANG Yingjie,TAN Xiyi,et al. Effect of additional control on frequency stabilization of generator governing system [J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(12):21-24.
- [3] 张仰飞,袁越,陈小虎,等. 汽轮发电机组的调速系统参数辨识[J]. 电力自动化设备,2006,26(12):32-35.
ZHANG Yangfei,YUAN Yue,CHEN Xiaohu,et al. Speed-adjustable system parameter identification for steam turbine-generator unit[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(12):32-35.
- [4] 王明东,刘宪林. 调速器侧模糊电力系统稳定器改善水电系统稳定性的仿真研究[J]. 电力自动化设备,2003,23(9):36-39.
WANG Mingdong,LIU Xianlin. Research on stability improvement of hydroelectric system using governor fuzzy power system stabilizer[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(9):36-39.
- [5] 王明东,刘宪林. 基于模糊控制理论的水轮发电机组调速器侧 PSS 研究[J]. 郑州大学学报:工学版,2003,24(2):96-98.
WANG Mingdong,LIU Xianlin. Study of power system stabilizer for hydro-generator's governor based on fuzzy theory[J]. Journal of Zhengzhou University:Engineering Science,2003,24(2):96-98.
- [6] 王官宏,陶向宇,李文峰,等. 原动机调节系统对电力系统动态稳定的影响[J]. 中国电机工程学报,2008,28(34):80-86.
WANG Guanhong,TAO Xiangyu,LI Wenfeng,et al. Influence of turbine governor on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(34):80-86.
- [7] 于达仁,徐基豫. 汽轮机调速系统对发电机稳定的影响[J]. 电力系统自动化,1996,20(1):23-26.
YU Daren,XU Jiyu. The effects of governor on the stability of turbo-generator[J]. Automation of Electric Power Systems,1996,20(1):23-26.
- [8] 易于. 复杂电力系统阻尼特性研究[D]. 北京:华北电力大学电气与电子工程学院,2004.
YI Yu. Damping characteristic research of complex electric power system[D]. Beijing:North China Electric Power University,2004.
- [9] 张利娟,陈庆国,陈海焱,等. 调速系统恶化阻尼的机理分析及改进措施[J]. 水电能源科学,2005,23(3):9-11.
ZHANG Lijuan,CHEN Qingguo,CHEN Haiyan,et al. Mechanism analysis for negative damping caused governing system and its improvement measure[J]. Water Resources and Power,2005,23(3):9-11.
- [10] KUNDER P. Power system stability and control[M]. New York, USA:McGraw-Hill,1994:377-460.
- [11] 刘取. 励磁控制与电力系统稳定[M]. 北京:中国电力出版社,2006:306-386.
- [12] 汤涌,卜广全,侯俊贤. PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册[M]. 3版. 北京:中国电力科学研究院出版科,2006:89-119.
- [13] 宋新立,仲悟之,汤涌,等. PSD-SSAP 电力系统小干扰稳定性分析程序[M]. 2版. 北京:中国电力科学研究院出版科,2007:38-39.

(实习编辑:李莉)

作者简介:

王官宏(1982-),男,重庆人,工程师,硕士,研究方向为电力系统源网协调、稳定控制(E-mail:wanggh@epri.sgcc.com.cn);

黄兴(1978-),男,内蒙古锡林浩特人,工程师,硕士,研究方向为汽轮机调速系统建模及稳定。

Influence of turbine governor parameters on power system damping

WANG Guanhong,HUANG Xing

(China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

Abstract: The mathematical models of turbine governor are established and simplified for the stability calculation of power system. The frequency domain analysis and time domain simulation indicate that different parameter configurations of turbine governor have different influences on power system,increasing or decreasing its damping. The magnification change has no influence on boundary frequency while the nonlinearity of damping,time constant and pure time delay are its main influencing factors. The impact of turbine governor on the damping characteristic of power system can be determined by the sign and magnitude of the added damping coefficient. The boundary frequency is the main criterion to evaluate the damping characteristic of governor. When the oscillation frequency is close to the boundary frequency,the added damping coefficient is nearly 0 and the impact of turbine governor on system can be ignored,otherwise,it should be considered. The results of slight disturbance analysis and time-domain simulation for three-machine nine-bus system verify the correctness of theoretical analysis.

Key words: turbine governor; boundary frequency; damping characteristic; power system