

考虑主蒸汽压力变化的机组一次调频动态特性

刘晓强¹, 王西田²

(1. 上海汽轮机有限公司自控中心, 上海 200240; 2. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200240)

摘 要: 在研究一次调频动态特性时, 一般都假定机组锅炉蓄热能力足够大, 以至于主蒸汽压力恒定不变, 主蒸汽流量与汽门开度成正比。但是实际上, 机组蓄热能力总是有一定限度的, 当机组蓄热用尽或主蒸汽压力因汽门开度的变化而变化时, 一次调频的性能就会受到影响。研究主蒸汽压力变化对汽轮发电机组的一次调频动态特性的问题, 并进行了建模, 并分别在频域和时域进行了仿真分析。研究结果表明, 一次调频动态特性在较高频段差异很小, 而在低频段则有明显的差异。考虑主蒸汽压力动态后的一次调频的低频增益明显偏小, 对控制较低频或者较长时间过程的电网周波变化是不利的, 会出现一定时间过程之后一次调频出力回落、偏离理想设计性能的现象。为提高调频性能, 需要合理设置 CCS 系统, 以及对一次调频和二次调频进行协调。

关 键 词: 汽轮发电机; 一次调频; 动态特性; 主蒸汽压力

中图分类号: TK32 文献标识码: A

引 言

电力系统频率不仅是电力系统运行的重要质量指标, 也是影响电力系统安全稳定运行的重要因素。电力系统频率反映了有功功率的供需平衡情况, 由于电力系统负荷一直处在变动之中, 负荷波动势必导致电力系统频率的波动, 因此频率调整是电力系统运行的一项重要任务。电力系统频率调整包括一次调频和二次调频: 一次调频是指由发电机组的调速器自动地根据频率(或转速)偏差调整机组出力, 限制电力系统频率的变化; 二次调频是指由电力系统调度发令, 通过手动或自动装置改变调速器功率的给定值, 进而调整机组出力, 维持电网周波的稳定^[1]。在电力系统用电负荷变化无常、难以准确预测的情况下, 一次调频能把频率偏差控制在更小的范围内, 对保证电网周波的稳定意义重大。

传统的一次调频特性定义为静态时汽轮机功率与其转速之间的关系曲线, 又称汽轮机调节系统的静特性, 对应表征一次调频特性的基本参数是汽轮

机调节系统的不等率 δ 它反映了汽轮机功率变化与电网周波变化之间的静态放大倍数。为了考察汽轮机功率对不同变化速度的电网周波偏差信号的响应特性, 文献[2]提出了一次调频动态特性的概念, 这是从动态角度研究一次调频特性的开端。对于汽轮机来说, 通常认为一次调频就是通过调节汽门开度、利用机组蓄热能力来快速响应电力系统频率的变化, 因此目前在研究一次调频动态特性时, 一般都假定机组蓄热能力足够大, 以至于主蒸汽压力恒定不变, 主蒸汽流量与汽门开度成正比^[3]。但是实际上, 机组蓄热能力总是有一定限度的, 当机组蓄热用尽或主蒸汽压力因汽门开度的变化而变化时, 一次调频的性能就会受到影响。上海电网一次调频的实践就表明, 在某一次周波向下变化的联调试验中, 曾有机组一次调频出力达到最大值后, 维持了十几秒钟, 然后迅速下降^[4]。

为此, 本文对主蒸汽压力变化对汽轮发电机组的一次调频动态特性的影响进行了研究, 通过建模和仿真, 探讨了机组一次调频性能偏离理想情况(主蒸汽压力恒定不变)的机理。

1 考虑主蒸汽压力动态的一次调频系统模型

设研究对象为一台带纯转速调节系统的再热式汽轮机, 并采用文献[5]提出的考虑非线性特性的汽包锅炉动态模型, 考虑了主蒸汽压力以及汽包压力的动态过程。图 1 给出了考虑主蒸汽压力动态的一次调频系统模型, 各参量含义及其取值为^[2,3]: T_0 为高压缸容积时间常数, 0.2 s; T_{RH} 为再热容积时间常数, 8 s; α_H 为高压缸功率系数, 0.3; T_a 为转子时间常数, 8 s; β 为自平衡系数, 0; T_r 为发电机时间常数, 0.005 s; C_d 为异步功率系数, 15; δ 为调速不等率, 0.05; T_s 为油动机时间常数, 0.25 s; K_1 为汽包

收稿日期: 2007-08-07; 修订日期: 2007-11-26

作者简介: 刘晓强(1971-), 男, 四川德阳人, 上海汽轮机有限公司自控中心副主任。

蓄热系数的倒数, $1/90 \text{ s}^{-1}$; K_3 为主蒸汽管道蓄热系数的倒数, $1/5 \text{ s}^{-1}$; $K_2=3.5, K_4=4.167, K_5=0.238, K_6=60/1050$, 各参数为锅炉模型的内部平衡系数; T_g 为磨煤机惯性时间常数, 30 s ; τ 为纯延迟时间常数, 40 s ; T_w 为水冷壁惯性时间常数, 5 s ; P_T 为汽轮机功率的标幺值; P_e 为发电机负荷的标幺值;

φ_s 为电网频率的标幺值; φ_T 为机组转速的标幺值; u 为汽门开度的标幺值; P_b 为汽包压力, 额定值 18.9175 MPa ; P_t 为主蒸汽压力, 额定值 17.5 MPa ; D_t 为主蒸汽流量的标幺值; B 为有效吸热量的标幺值。

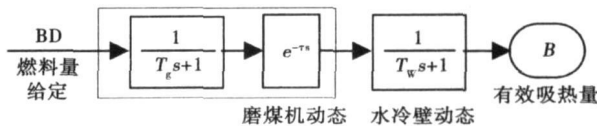
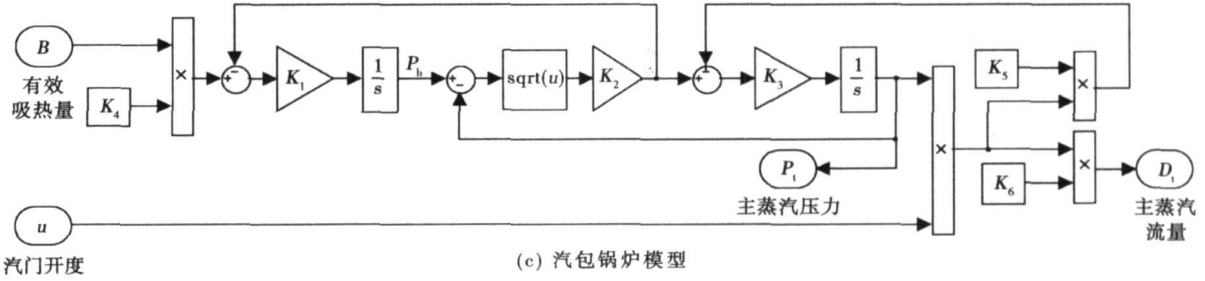
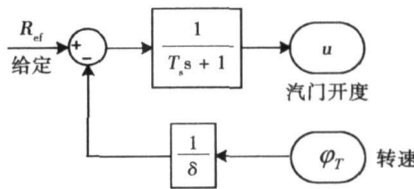
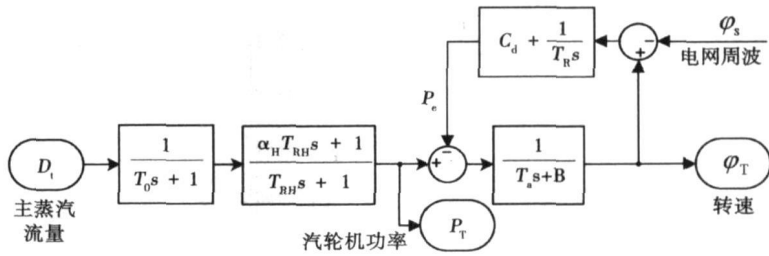


图 1 考虑主蒸汽压力动态的一次调频系统模型

2 一次调频动态特性分析

一次调频动态特性定义为汽轮机功率与电网周波偏差信号之间的闭环幅频特性

$\left| \frac{P_T(s)}{\varphi_s(s)} \right|^{[2]}$ 。根据图 1 给出的模型, 可以得到研究系统的一次调频动态特性曲线, 如图 2 所示。其中, 曲线 1 对应为主蒸汽压力恒定不变的理想情况, 曲线 2 则对应考虑了主蒸汽压力动态的影响。

由图 2 可见, 是否考虑主蒸汽压力动态的影响, 一次调频动态特性在较高频段基本一致, 而在低频段则有明显的差异, 考虑主蒸汽压力变化后的一次调频的增益总体上偏小, 且频率越低、偏差越大。在主蒸汽压力恒定不变的理想情况下, 在电网周波变化较慢时一次调频动态特性就是汽轮机调速系统的静特性, 即调速不等率的倒数。在考虑主蒸汽压力变化后情况却完全不同, 曲线 2 对应的一次调频静态增益趋近于零, 这是因为静态时汽轮机功率对应

依赖于燃料量,而本文的研究系统没有考虑燃料量的变化。可见要改善一次调频的低频特性,需合理设置机炉协调控制系统(CCS)对燃料量进行控制。曲线2表明,考虑主蒸汽压力变化后,一次调频对控制较低频或者较长时间过程的电网周波变化有局限性,会偏离理想情况下的性能。实际上控制低频段的电网周波变化应该是二次调频的主要任务,从这一角度看,一次调频和二次调频应该有合理配合。

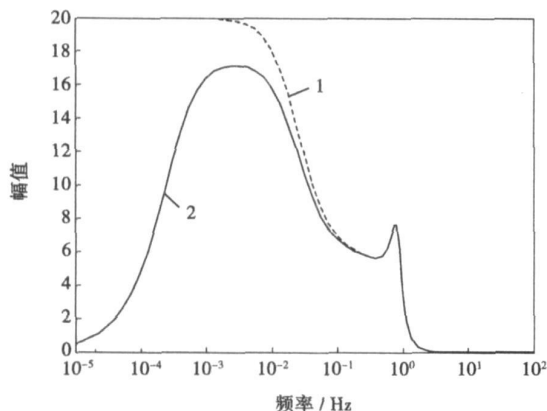


图2 一次调频动态特性

3 一次调频性能的时域分析

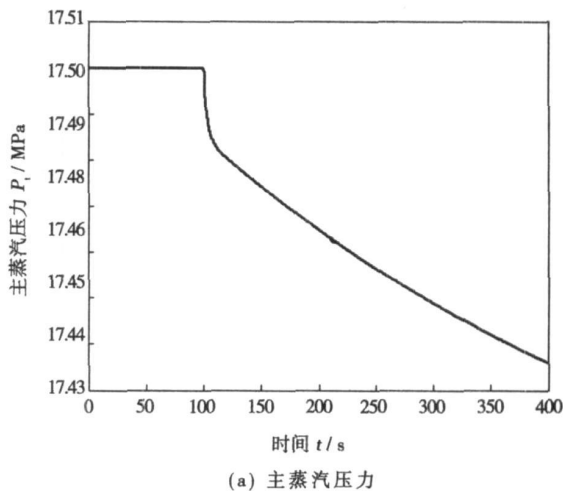
针对图1所示系统,对电网周波向下阶跃扰动0.05 Hz的情况进行了时域仿真,扰动在100 s时刻发生,仿真时另外考虑汽门过开限幅为10%、开度变化率限制为±0.01 p.u./s、调频死区±2 r/min。

图3(a)给出了主蒸汽压力的变化曲线,可见主蒸汽压力是逐渐降低的。图3(b)曲线2是这一过程的汽轮机功率变化曲线,在扰动发生后一次调频出力迅速增加,约25 s后达到最大值,在最大值附近持续约10 s后又逐渐减小;而如果主蒸汽压力恒定不变,则一次调频出力达到最大值后维持不变,如图3(b)曲线1所示。

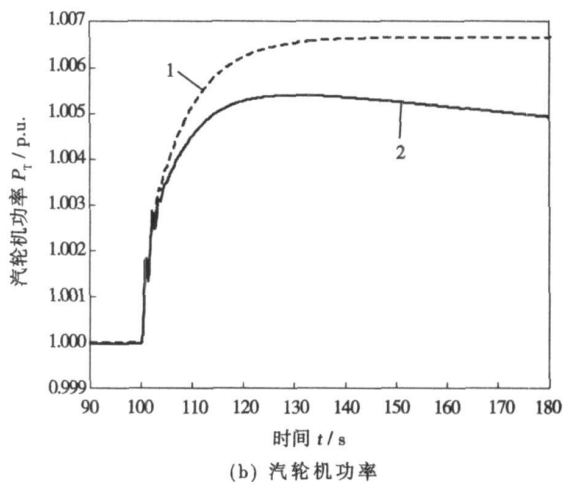
另外,上海电网于2001年9月进行了11台机组总容量为3570 MW的一次调频联调试验^[4],其中某台机组在周波向下变化的试验过程中的出力测量结果如图4所示。在试验过程中该机组 CCS 系统因故没有投运,机组锅炉并未增加燃料。由图4可见,该机组一次调频出力达到最大值后,维持了十几秒钟,然后开始下降,与图3(b)曲线2的规律非常接近。由此可得,如果机组蓄热用尽或主蒸汽压力变化较大,而燃料量没有或者来不及变化,就会出现一

次调频出力回落的现象,因此主蒸汽压力变化的影响就是机组一次调频性能偏离理想情况(主蒸汽压力恒定不变)的原因。

可见,时域分析与前面一次调频动态特性的分析结果是相互吻合的,也复现和解释了某台机组在一次调频试验过程中一次调频出力达最大值再回落的现象。



(a) 主蒸汽压力



(b) 汽轮机功率

图3 一次调频的时域仿真结果

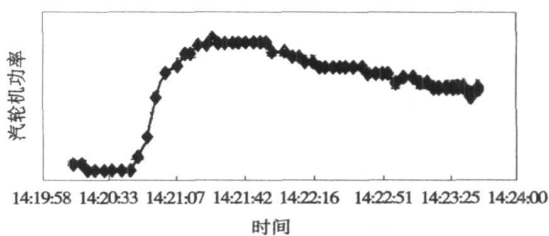


图4 某一次调频试验的机组出力测量结果

4 结 论

建模分析了主蒸汽压力变化对汽轮发电机组的一次调频动态特性的影响, 时域分析与频域分析结果相互吻合, 给出了某台机组在一次调频试验过程中一次调频出力达最大值再回落现象的机理解释。

分析结果表明, 一次调频动态特性在较高频段受主蒸汽压力变化的影响不大, 而在低频段考虑主蒸汽压力变化后一次调频的增益明显偏小, 对控制较低频或者较长时间过程的电网周波变化有局限性, 会出现一定时间过程之后一次调频出力回落、偏离理想设计性能的现象。在燃料量没有或者来不及变化的情况下, 一次调频的静态增益趋近于零, 不再

反映汽轮机调速系统的静特性。为提高调频性能, 需要合理设置 CCS 系统, 以及对一次调频和二次调频进行协调, 这也是值得进一步研究的技术问题。

参考文献:

- [1] 蔡 分. 电力系统频率[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 于达仁, 毛志伟, 徐基豫. 汽轮发电机组的一次调频动态特性[J]. 中国电机工程学报, 1996 16(4): 221-225.
- [3] 郭钰锋. 电网调频过程的动态特性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [4] 上海市电力试验研究所. 上海电网火电机组一次调频对策研究技术报告[R]. 上海: 上海市电力试验研究所, 2002.
- [5] 曾德良, 刘吉臻. 汽包锅炉的动态模型结构与负荷/压力增量预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 75-79.

(编辑 伟)

新技术、新产品

ГТЭ—65 燃气轮机装置热力系统参数的选择

《Тяжелое машиностроение (重型机械制造)》2007 年 7 月号报道, 在建厂 150 周年之际, ЛМЗ (列宁格勒金属工厂) 建造了俄罗斯相应于世界“F”技术等级的中等功率等级的 ГТЭ—65 燃气轮机装置。

涡轮前的燃气温度是热力循环效率的决定性参数, 即它表征了具体的燃气轮机的技术水准。考虑到两个限制因素: 保证低排放燃烧室内足够过量空气的必要性和为保证涡轮高温部分冷却和规定寿命所需要的空气流量, 选择 ГТЭ—65 涡轮前的燃气温度为 1 280 °C (国外同类机组约为 1 310 °C)。

对于在蒸燃联合循环组成中工作的燃气轮机装置, 排气温度是一个极为重要的参数。由于汽轮机装置更高的蒸汽参数, 燃气轮机装置后排气温度越高, 蒸燃联合循环装置的效率就越高。考虑到这一点, 根据强度和热效率的要求, 选择 ГТЭ—65 的排气温度为 555 °C (国外同类机组约为 580 °C)。

考虑到涡轮中的膨胀比, 及在燃烧室和燃气轮机装置排气通路内的损失, 压气机的压比选择为 15.6 (国外同类机组约为 16)。

考虑到减速器和发电机内的损失, 在基本负荷输出功率为 61.5 MW (最大功率为 65 MW) 时, ГТЭ—65 的发电效率为 35.2%。(国外同类机组约为 34%)。

构成联合循环装置时, 在 90 MW 输出功率下的净效率为 51.5% (国外同类机组约为 53%)。

ГТЭ—65 首制样机的参数是以这样的方式确定的, 一方面要使该燃气轮机装置在本国的市场中能与外国的同类机组竞争, 另一方面是最大限度地降低首制样机制造时的技术风险, 这归因于在订货方运行对象上不可避免的实物试验最小的工作量。为此, ГТЭ—65 所有主要的部件均在 ЦКТИ (中央锅炉涡轮机研究所)、ЛМЗ 和 ПП «Ивченко Промис» 进行模型试验。

(吉桂明 供稿)

In the light of the huge amount of time-consuming CFD (computational fluid dynamics) calculations during the numerical optimization of a turbo-machinery unit, developed was an optimized design method based on an approximate model. The keystone of the method under discussion consists of a sample database used for establishing an approximate model between the sample-point-based geometrical information and its performance. The optimization method has been applied to the optimized design of centrifugal compressor blades. With a maximized isentropic efficiency serving as an objective function and under the condition of keeping the flow rate and total pressure ratio not being decreased, the isentropic efficiency of the impeller has been increased by 2.7% after the optimization. Moreover, the optimized blade profile became more straight and flat, and the blade tip profile underwent a more conspicuous change than that of the blade hub profile. **Key words:** compressor, optimized design, blade, approximate model

考虑主蒸汽压力变化的机组一次调频动态特性 = **Dynamic Characteristics of the Primary Frequency Modulation of a Turbo-generator under a Due Consideration of Main Steam Pressure Variation** [刊, 汉] / LIU Xiao-qiang (Automation Control Center, Shanghai Steam Turbine Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200240), WANG Xi-tian (Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23 (2). — 140 ~ 143

During the study of dynamic characteristics of primary frequency modulation it is usually supposed that the boiler in a power plant has sufficient large heat-storage capacity to keep main steam pressure constant and its flow rate in direct proportion to the valve opening degree. In practice, however, the boiler heat-storage capacity is always limited. When the heat stored in the boiler is used up or the main steam pressure changes with the valve opening degree, the primary frequency modulation will be somewhat affected. The authors have established a model showing the influence of main steam pressure change on the primary frequency modulation characteristics of a turbo-generator unit, and conducted a simulation analysis respectively in the frequency and time domains. The research results show that the characteristics in question have a relatively small difference in the high frequency band, but a conspicuous one in the low frequency band. An excessively small low-frequency gain may evidently result from the primary frequency modulation when the main steam pressure is considered as dynamic, which is unfavorable for the control of the relatively low frequency and long-time grid cycle-wave variation. As a result, such a phenomenon as the falling of primary-frequency modulation output power leading to a deviation from the ideal design performance may occur after a certain period of time. To enhance the frequency modulation performance, it is necessary to rationally configure the CCS (coordinated control system) and coordinate the primary and secondary frequency modulation. **Key words:** turbo-generator, primary frequency modulation, dynamic characteristics, main steam pressure

基于改进型不变线矩特征的机组轴心轨迹形状自动识别 = **Automatic Identification of Plant Axial Trajectory Shapes Based on Improved Invariant Linear-moment Characteristics** [刊, 汉] / WAN Shu-ting (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, College of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003), WU Bing-sheng (College of Electro-mechanical Engineering, Hebei Engineering University, Handan, China, Post Code: 056038) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23 (2). — 144 ~ 147

Presented was an improved invariant linear-moment algorithm with a detailed mathematical expression and a demonstration process featuring an invariance that satisfies plant movement, rotation, elongation and compression. Furthermore, a novel