

燃气轮机发电机组突变负荷对性能的影响

张亚东, 姜里运, 韩晓光, 徐 鑫, 张 轲

(中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 针对突变负荷对快速响应和实时性的要求, 采用容积法建立分轴燃气轮机发电模型, 制定突变负荷的控制规律和串级三回路控制策略, 分析影响突变负荷性能的关键因素, 表明不同的限制参数对突变过程动态性能具有不同的影响, 合理的选取限制参数及限制值能够优化突变性能。通过燃气轮机发电机组突变负荷试验验证, 表明模型计算结果具有较好的实时性、收敛性与动态响应特性, 与试验结果的吻合性较好。通过对燃气轮机特性分析及发电机组突变负荷的试验研究表明: 为了获取良好的突变性能, 控制系统应在突变负荷 1 s 内达到燃料调节限制线; 甩负荷时需设置最小燃料限制值, 合理的选取限制值是保证稳定燃烧和控制超调量的关键。

关 键 词: 燃气轮机; 动态性能; 仿真与试验; 突变负荷; 甩负荷

中图分类号: V231

文献标志码: A

Effects of mutational load on performance of gas turbine generator set

ZHANG Ya-dong, JIANG Li-yun, HAN Xiao-guang,
XU Xing, ZHANG Ke

(Shenyang Engine Research Institute,
Aero Engine (Group) Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: According to the fast response and real-time simulation requirements of mutational load, a split shaft gas turbine power generation model was built using volumetric method to better accommodate rapid load changes. The control rules of step changes in load to be adopted and the cascade proportion integration differentiation (PID) control policy were presented. The key influential factors to dynamic performance of step changes in load were discussed. Simulation results show different limitations of parameters bring different effects on the gas turbine dynamic performance. Selecting limitations of parameters reasonably can optimize gas turbine dynamic performance. Results of model were presented and compared with the test data, indicating the model and engine agreed well for each other. The results show the model has good real time, convergent and dynamic response property. Theoretical analysis and test result demonstrate the fuel limitation curve should be operated in 1 s after rapid load changes to achieve better dynamic performance. The minimum fuel limitation is necessary for load rejection, and reasonable selection of the limit value is the key to ensure stable combustion and control speed overshoot.

Key words: gas turbine; dynamic performance; simulation and experiment;
mutational load; load rejection

随着航空技术的进步,航改燃气轮机在发电、舰船电力推进和应急电源领域被广泛地应用.通常并网发电可认为是无穷大电网,当改变发电机的输入机械功率和励磁电流时,可改变输出的有功功率和无功功率,但不能改变电网频率和电压^[1],而舰船电力系统可看作一个独立电网,由于这种独立电网容量小,负荷变化频繁,变化过程为阶跃性突变形式,调节运行发电机的电压或原动机的转速将直接影响电网的电压和频率^[2-3],特别是大功率负荷变化时的电流变化可能引起电网电压和频率急剧波动,若控制不稳,不但会影响用电负荷的正常工作,还可能引起发电机组全甩负荷.因此这种孤网运行的电力系统对燃气轮机和调速器的动态性能有很高的要求.

发电机组突变负荷过程中维持驱动负荷工作转速在允许范围内是关键,这要求燃气轮机应能快速调整工况,缩小与负荷之间的功率不平衡量,降低转速超调或下垂量.国外对燃气轮机发电机组突变负荷进行了较深入研究,Al-hamdan等^[4-5]对船舶电力推进燃气轮机突变性能进行了建模和试验研究,结果表明,当负荷阶跃性变化时,发电频率变化不仅与每次加载量有关,还取决于燃机动态特性,为了适应负荷快速变化,试验过程中应有防止压气机喘振和燃烧室熄火等控制措施.Camporeale等^[6-7]对燃气轮机在甩负荷条件下的动态性能进行了研究.国内在这方面也有探索性研究^[8-9],但基本以仿真计算和半物理模拟为主,对发电机组突变负荷性能主要影响因素的分析及控制策略的研究较少.

本文根据孤网发电负荷变化快速性的特点,建立燃气轮机发电仿真模型,制定分轴燃机突变负荷的控制规律和控制策略,分析影响分轴燃机发电机组突变负荷性能的主要因素,最终指导了燃气轮机发电机组联调试验.

1 发电机组仿真模型

1.1 数学模型

燃气轮机是一个高度非线性的热力系统,决定其动态过程的因素主要有转动惯性、容积惯性和热惯性.常规计算一般会忽略相对于转动惯性较小的容积惯性和热惯性,认为任意时刻部件的进出口质量流量和吸放热都处于平衡状态,这样方程得到了简化,但每一循环计算需通过大量的迭代计算才能求出方程解,因此动态过程的实时性很难得到保证.本文采用容积法建立分轴燃气

轮机发电模型,考虑了单位时间内存在的容积惯性的影响,回避了通常的部件级模型在计算时通过大量迭代过程求解非线性微分方程的不足,节省了计算时间,满足了突变负荷实时性要求.

压气机和涡轮模块选用常规建模方法,不作详细说明.

1.1.1 燃烧室模块

假设燃烧室为一个容积部件,但是燃烧室模块与纯容积模块仍然存在着不同之处,因为它并不是完全绝热的,而是有能量加入的模块,由于空气与燃料的掺混燃烧,燃烧室内部的工作情况会变得非常复杂.

燃烧室的热惯性和容积效应由下面的非定常过程描述^[10]:

$$\frac{dT_{out}}{dt} = \frac{R_{out} T_{out}}{p_{out} V \frac{d(H_{out}/\kappa)}{dT_{out}}} \left[m_f (\eta_{cmb} H_u + H_f - \frac{H_{out}}{k}) + m_{in} \left(H_{in} - \frac{H_{out}}{k} \right) - m_{out} (\kappa - 1) \frac{H_{out}}{k} \right] \quad (1)$$

$$\frac{dp_{out}}{dt} = \frac{RT_{out}(m_f - m_{out})}{V} + \frac{p_{out}}{T_{out}} \cdot \frac{dT_{out}}{dt} \quad (2)$$

式中 T, p, m, V, η 分别为总温、总压、流量、容积、效率; H, κ, R, H_u 分别为焓、等熵指数、气体常数、燃料低热值;下标 f, in, out, cmb 分别为燃料、进口、出口、燃烧.

1.1.2 容积模块

容积模块是代表具有一定当量容积的流动连接部分及管路连接段.忽略容积内流体同外界的传热及进出口的压差.用一个集总参数 p 表示容积中气体的平均压力,在动态计算中主要考虑因流量差引起的压力变化,根据质量守恒,可得如下微分方程:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT_{out}}{V} (m_{in} - m_{out}) \quad (3)$$

式中 R 为气体常数, V 为容积模块容积.

1.1.3 转子模块

转子的转动惯性对燃气轮机动态过程影响很大,而热惯性的作用相对于转动惯性来说是很小的,对于负载变化快的发电燃机来说,其影响基本可以忽略^[11].转子具有的转动惯量随转速的大小而改变,在过渡态过程中,作用于转子体上的不平衡功率使得转子加速或减速,根据动量矩定律,转子的运动方程可表达为

$$\frac{dn}{dt} = \frac{900}{J\pi^2 n} (P_t - P_l - P_m) \quad (4)$$

式中 P_t, P_l, P_m 分别为动力涡轮功率输出、电负荷功率、机械损失功率; J, n 分别为转动惯量、转子转速. 对于高压涡轮转子的运动方程, 仅将 P_t, P_l 分别改为涡轮功率、压气机消耗功率.

1.2 燃料调节控制系统

当发电负荷的功率需求发生变化时, 就会引起动力涡轮转速的变化, 为了使其快速稳定到规定的转速范围内, 就必须使用一种有效的控制方法. 采用动力涡轮转速单回路 PID(proportion integration differentiation) 控制方案, 结构简单、容易实现, 在涡轴发动机机械液压式控制系统中曾广泛采用^[12], 但该方案对发动机内部扰动响应慢、动力涡轮给定转速及反馈偏差大, 调节时间较长. 串级控制系统具有很多优点, 在发电用燃气轮机

控制系统设计中, 充分利用串级控制的特点, 可获得比单回路控制系统更高的控制质量^[13-14]. 本文的调速器选用了响应速度快、稳定性能好、结构简单、参数调节方便的串级三回路 PID 控制结构, 见图 1, 图中 $n_{p, gd}$ 为动力涡轮给定转速; $n_{g, gd}$ 为燃气发生器给定转速; $m_{t, gd}$ 为给定燃油流量; m_t 为燃油流量; f 为扰动. 其中外侧回路(回路 A)是主控回路, 作用是控制动力涡轮转速 n_p ; 中间回路(回路 B)是副控制回路, 作用是调节燃气发生器转速 n_g ; 内测回路(回路 C)也是副控制回路, 作用是控制电液伺服阀供油量大小. 由于串级多回路控制能够及时抑制内侧回路扰动, 而不对外侧回路造成很大影响, 同时还可提高系统控制质量和工作频率, 因此对发电负荷这种变化剧烈的扰动具有较强的适应性.

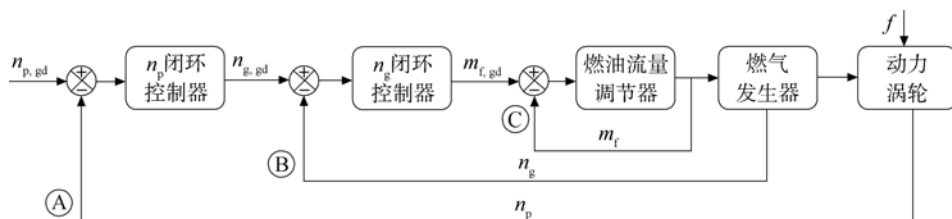


图 1 串级 PID 控制系统结构

Fig. 1 Control structure of the cascade PID control system

1.3 主要限制参数

1.3.1 正常突变过程参数限制

突增负荷时, 为了降低动力涡轮下垂量, 缩短其转速恢复时间, 应尽可能提高燃气发生器升转速率, 但在实际加速过程中, 供油量增加越快, 加速工作线越逼近压气机的喘振边界, 严重时会造成喘振. 为保证压气机稳定工作, 通常需增加升转速率限制. 虽然分轴燃机不像双轴燃机存在减速快引起低压喘振的问题, 但有些情况为了使压气机进口可调导叶角度能够较好地跟随燃气发生器转速, 也设置了降转速率限制. 另外, 加速过程中, 燃料量迅速增加, 油气比显著升高, 当升高到某一极限时将导致富油熄火; 减速时燃料量突然减小, 由于惯性发动机尚处于较高的转速, 而空气流量下降较慢, 若处于贫油边界, 可能引起贫油熄火. 为保证稳定燃烧, 通常设置油气比限制.

加速时燃气发生器换算转速变化速率限制

$$\frac{dn_g}{dt} \leq \left(\frac{dn_g}{dt} \right)_{\max} \quad (5)$$

减速时燃气发生器换算转速变化速率限制

$$\frac{dn_g}{dt} \geq \left(\frac{dn_g}{dt} \right)_{\min} \quad (6)$$

加速时油气比限制

$$f_{ac} \leq f(p, n_g)_{\max} \quad (7)$$

减速时油气比限制

$$f_{dc} \geq f(p, n_g)_{\min} \quad (8)$$

1.3.2 其他限制

甩负荷时为了防止燃气发生器降转过低或燃烧室熄火, 设置了最小燃油量限制. 另外为了防止突加至 100% 相对功率时加油过快导致涡轮出口温度超温停车, 设置了最大供油量限制, 一般最大供油量可设为不超过 100% 相对功率的 5% ~ 10%.

2 突变负荷性能主要影响因素分析

2.1 突变负荷量

发电机组突变负荷的大小直接影响动力涡轮转速的超调或下垂量, 进而影响发电品质. 假定机组在第 0 s 时(以突变前为起点, 下同)保持 28% 相对功率稳定运行, 而在第 0.1 s 时分别发生了 10%, 20%, 25% 相对功率的突增, 在保持控制调速率不变的条件下最终使动力涡轮工作转速都恢复至额定转速, 如图 2 所示. 随着负荷突增量的增

加,动力涡轮转速下垂量($\Delta n_p/n_{p0}$)和恢复时间 t 都相应增加,逐渐趋近相应标准的限制值。

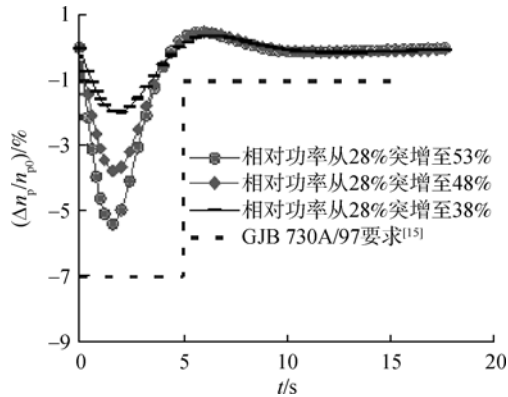


图 2 不同负载突增量下动力涡轮转速动态响应情况

Fig. 2 Rotor speed of power turbine changes in response to load changes

2.2 动态响应速度

燃料供入燃烧室燃烧实际存在一定的时间延迟,燃料化学能转变为燃烧热能的时间长短将影响涡轮前后温度的变化.对于突增负载,当考虑燃烧延迟时,涡轮前和涡轮后温度也会响应延迟,导致同一时刻动力涡轮输出功相对减小,与同轴系电负载之间的功率不平衡量 Δp 增大,最终导致动力涡轮转速下垂量相对增大.为了研究这一影响,在计算模型燃料系统方案中引入了两个 1 阶拉普拉斯传递函数^[16-17],如图 3 所示,其中第 1 个传递函数考虑了阀位置系统动态特性;第 2 个传递函数代表燃料在管路中的流动特性,图中 s 为控制变量.本文除考虑燃料系统流动时间外,还考虑了燃烧时间,并统一作为燃烧延迟时间.图 4 分析机组从 60% 相对功率突增 30% 时(程序计算时突变负时间均为 0.1 s)燃烧延迟时间变化对动力涡轮转速下垂量的影响,当延迟时间从 0 s 增至

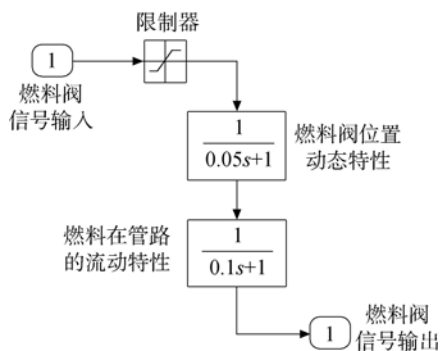


图 3 燃料系统传递函数

Fig. 3 Transfer functions for fuel system actuators

0.3 s 时,动力涡轮下垂量增加了 1%.为改善发电品质,调节阀全行程动作时间应尽可能短,管路流阻应尽可能小,控制响应时间应尽可能短。

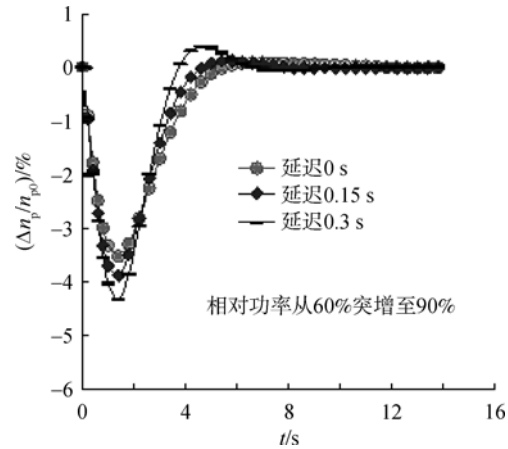
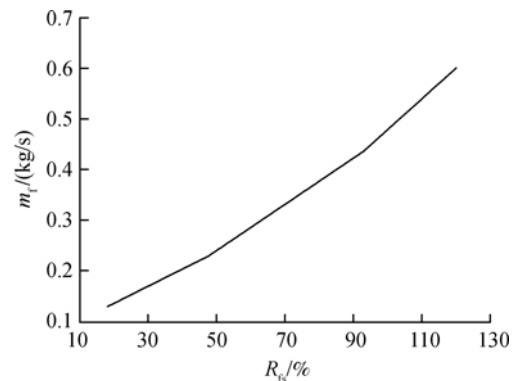


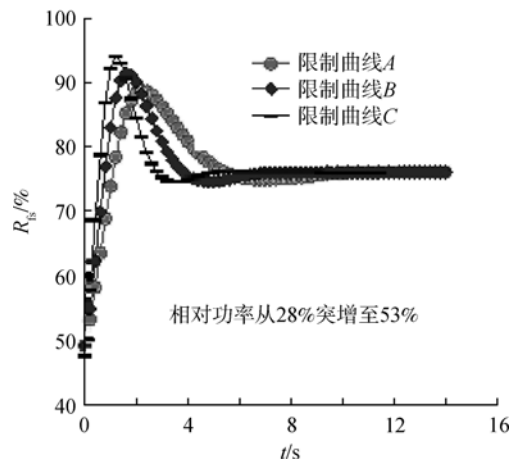
图 4 燃烧延迟时间对动力涡轮转速的影响

Fig. 4 Dynamic performance of rotor speed of power turbine in different delay times

研究表明控制调速率的快慢将直接影响突变负荷动力涡轮转速动态特性.图 5 为机组从 28% 相对功率突增至 53% 相对功率时运行参数变化情况,图中 ΔS_w 为喘振裕度,其中燃料限制曲线



(a) 燃料流量与燃料阀相对位置近似关系



(b) 燃料阀相对位置

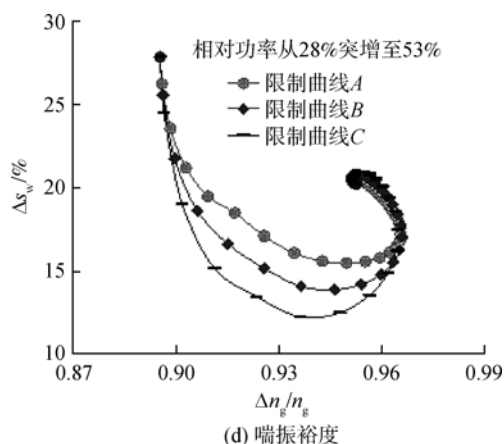
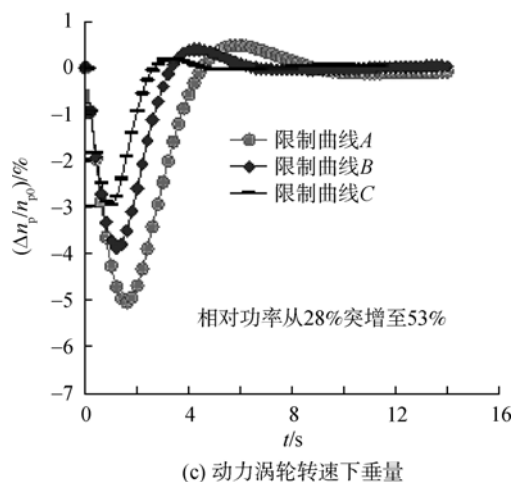


图5 不同燃料控制规律对动态性能的影响

Fig. 5 Dynamic performance changes at different fuel schedules

C加速最快,且燃料峰值最高,动力涡轮转速下垂量最小,恢复时间最短,但同燃气发生器相对换算转速($\Delta n_g/n_g$)下压气机工作裕度下降最大.为了保证负荷突变过程燃气轮机稳定运行,控制系统应合理设定调速率及燃料供应限制曲线,且各限制值的设定应考虑运行条件变化的影响,如热态、冷态运行和性能衰减等对压气机工作裕度额外的需求.

2.3 基准工作频率

突变负荷时频率变化量(对应转速的超调或下垂量)不仅取决于负荷的突变量和燃气轮机调节系统的响应速度,还取决于工作频率.式(9)给出频率变化量、转动惯量和额定工作频率的近似关系,在其他参数相同的条件下,突变负荷时50 Hz发电机组的频率变化量要比60 Hz的大约44%^[5].由于燃气轮机的特性决定其各工况的做功能力具有较大的差别,当燃气发生器变化相同转速时高工况时的输出功明显高于低工况,这将

引起同一时刻燃机输出功与负荷耗功之间的平衡性差异,从而影响突变一定负荷时的频率变化量.对于工作频率为50 Hz的发电机组,为提高空载突增能力,在加载前可适当提高空载状态频率,而在加载过程中再通过调整动力涡轮转速给定使频率恢复至50 Hz.

$$\Delta f \propto \frac{E}{2 \cdot J \cdot F_1^2} \quad (9)$$

式中 Δf 为频率变化量; E , J , F_1 分别为负荷过剩能量、转动惯量、起始工作频率.

2.4 转动惯量

转子的转动惯量是影响突变负荷转速超调或下垂量的另一重要因素.图6给出同一工况下突减20%相对功率时转动惯量 J 变化对转速的影响,随着转动惯量的增加,工作转速超调量降低,但转速恢复时间也会相应的延长.

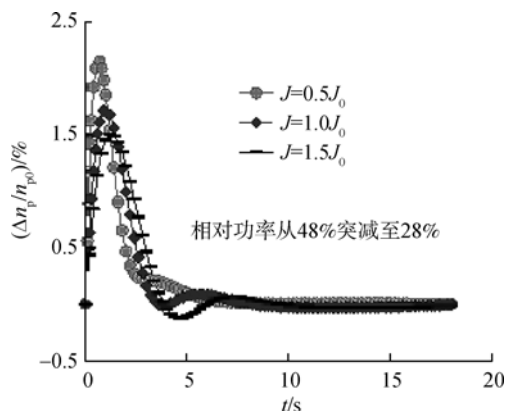


图6 不同转动惯量对动态性能的影响

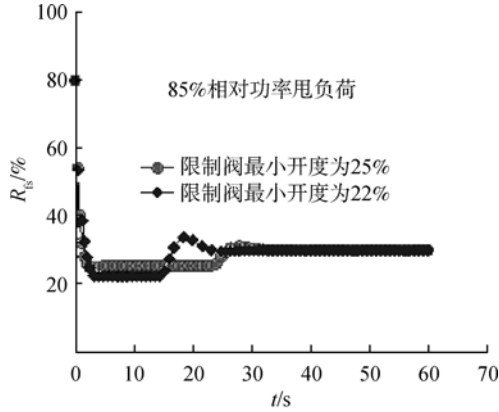
Fig. 6 Dynamic performance changes in response to inertia changes

2.5 最小燃料量

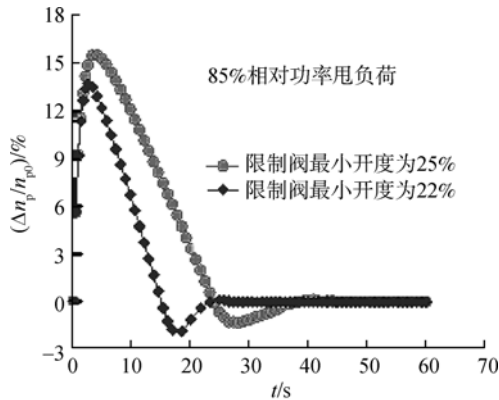
发电机组有时会因电压和频率急剧波动引起短路器开关保护跳闸,这样电负载将会瞬间失去全负荷,即甩负荷,极端情况是机组在额定工况时发生甩负荷现象.相关标准要求发生在甩负荷时既要保证动力涡轮不飞转或超过机组要求的转速限制值,同时还要快速调节燃气发生器转速使动力涡轮转速稳定至正常发电工作转速下,以便执行再次加载.研究表明,为了防止甩负荷时燃烧室熄火,除需增加油气比和限制速率外,还需增加最小燃料量限制,该值的大小不仅影响燃机工作稳定性,还会影响动力涡轮超调量及转速恢复时间.图7给出甩负荷时燃调阀相对位置(R_{sv})最小开度限制对动态性能的影响,当开度限制从25%降

至22%时,动力涡轮最大超调量下降约2%,转速恢复时间减少8s。

此外,选择先进的控制算法,增加负荷变化的前馈条件可较好的抑制转速超调或下垂量,提高



(a) 燃料阀相对位置



(b) 动力涡轮转速超调量

图7 最小燃料量限制对动态性能的影响

Fig. 7 Comparison of dynamic performance of rotor speed at different minimum fuel restrict

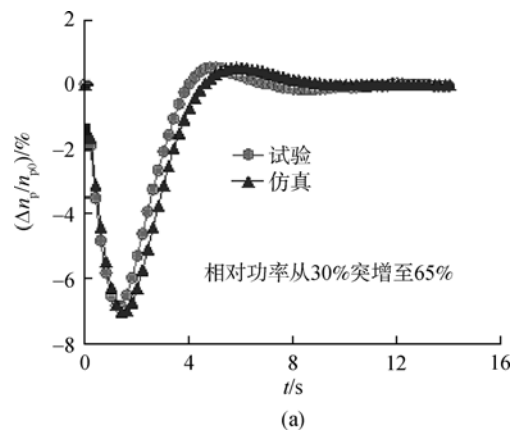
系统的抗扰效果^[18]. 相关研究还表明压气机放气不仅可提高喘振裕度,还可降低甩负荷时动力涡轮转速超调量^[19].

3 联调试验结果与分析

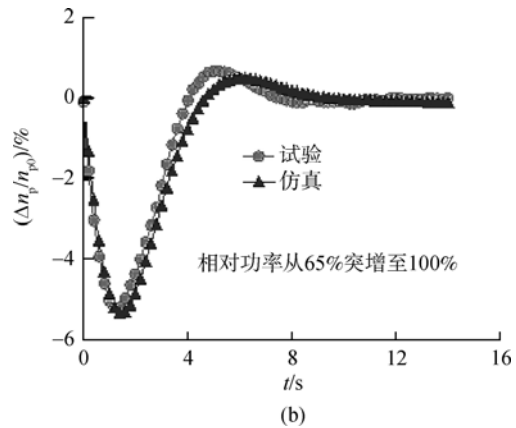
发电机组试验主要由燃气轮机、减速器、发电机、变压器和可变负荷组成,其中可变负荷由5套功率相等的电阻堆组成,每个电阻堆含有不同的功率档,每个对应功率下都有相应接触器开关使发电机与负荷连接上,当需要增加某一功率时只需使接触器开关合上,当需实现甩负荷时只需同步断开所有接触器或直接分闸来实现. 每个电阻堆可组合不同功率档后完成一次加减载,各个电阻堆之间也可交叉组合完成所需功率的加减载,负荷变化既可手动切换完成,又可按照某一设定

步长自动逐级加载或减载,如从空载按20%额定负荷每级逐级加至100%额定负荷,每次加载间隔10s。

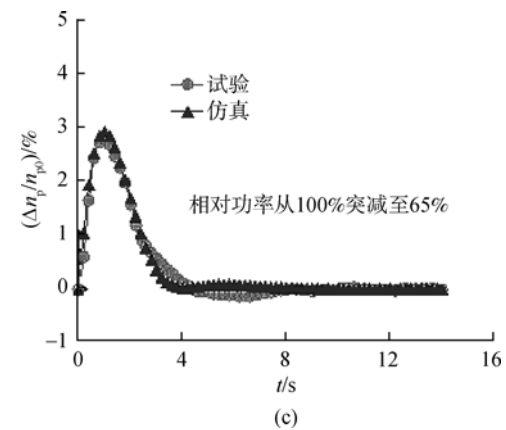
按照上述燃料调节控制规律及控制策略进行了试验调试,未发生压气机喘振现象,仅在空载突增过程中发生了一次失速,控制系统立即触发温升保护. 在优化甩负荷防熄火试验时发生了2次熄火,通过熄火判据自动切断燃料,并执行保护停车. 试验时对燃气轮机限制速率、燃料限制及串级PID控制算法进行了多次优化,最终获得突变负荷的动态性能见图8. 可以看出模型计算及试验



(a)



(b)



(c)

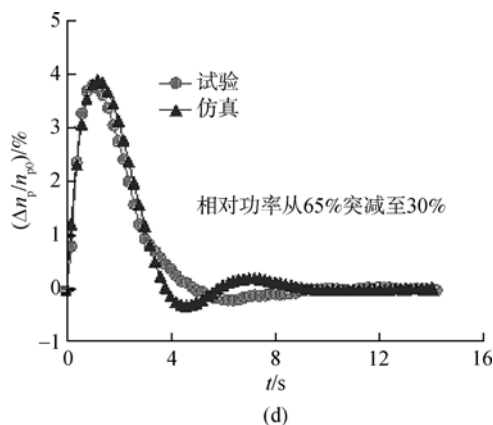


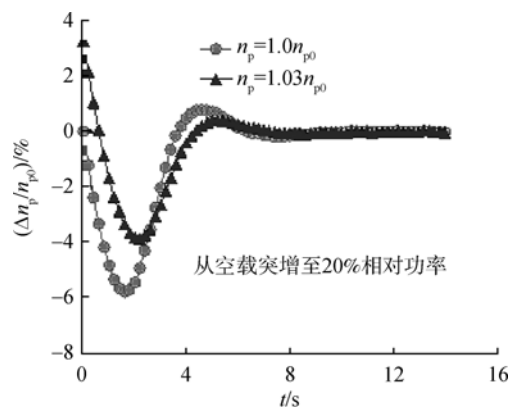
图8 突增和突减负载时试验与仿真曲线对比
Fig. 8 Comparison of model and engine speed traces for various load steps

对应的转速动态响应特性具有较好的同步性,说明计算模型可较好地预测不同负载变化下转速动态响应结果.另外其他测试参数如温度、燃料和燃气发生器转速等变化趋势也基本一致,限于篇幅不作详细说明.

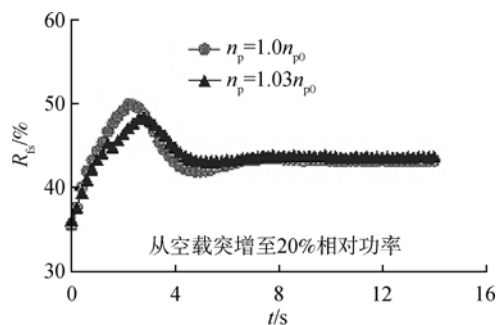
图8试验结果表明,在30%相对功率基础上可突增35%,且瞬态发电品质满足GJB 730A/97的标准要求,而燃机在突减35%相对功率,瞬态发电品质不仅明显优于GJB 730A/97的标准要求,同时还可满足备用电源发电机组要求转速超调量不大于4%,转速恢复至2%工作转速的时间不大于3s的要求,说明突减负荷的发电品质明显优于突增负荷.试验结果还表明燃机在高工况的突变性能明显优于低工况,这是由燃气轮机特性所决定的.通常燃气轮机设计时高工况效率要比低工况的高,同一燃气发生器变化速率下动力涡轮输出单位功将更高,突变负荷过程中燃机输出功与电负荷消耗功之间的不平衡性相对较小,因此高工况突变负荷的发电品质要优于低工况.

图9为从空载突增20%相对功率时改变空载起始工作转速对下垂量及恢复时间的影响,当起始转速提高3%后,最大下垂量降低约2%,恢复时间减少约0.5s.从图9(b)看出提高起始工作转速后在第1.5s附近燃料阀开度有突减趋势,这是由控制动力涡轮工作转速给定由 $1.03n_{p0}$ 调至正常工作转速 n_{p0} 所致.

经调试机组可实现从100%相对功率突甩至0%,且能快速稳定于空载并等待再次加载,燃机动态参数变化情况见图10.甩负荷时转速超调量最大达到18%,恢复时间约20s(以偏离 $\pm 2\%$ 工作转速计时),在甩负荷第1.2s后燃料系统调节

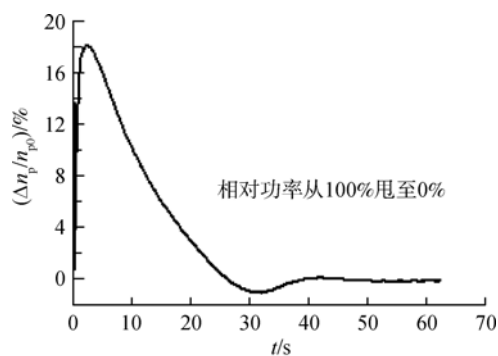


(a) 动力涡轮转速下垂量

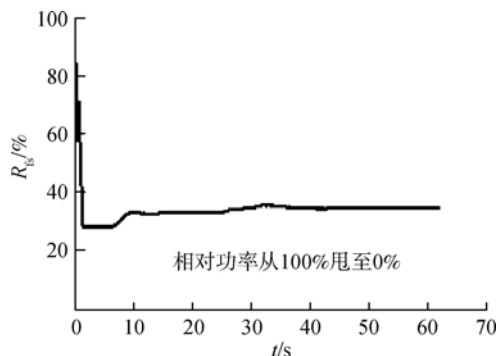


(b) 燃料阀相对位置

图9 初始工作转速对空载突增动态响应特性的影响
Fig. 9 Comparison of dynamic response for various initial nominal speed



(a) 动力涡轮转速超调量



(b) 燃料阀相对位置

图10 100%甩负荷试验时超调量和燃料变化曲线
Fig. 10 Experimental results for overshoot and fuel traces

阀调至最小阀位限制位置并保持(对应图10(b)第1.2s~第7s),第2s时动力涡轮转速上冲至最大,随后逐渐稳定至工作转速,可以看出甩负荷动态性能明显差于图8中的突减负荷,除上述分析的负载突变量有影响外,主要受到最小燃料量限制的影响,虽然优化后最小阀位开度已比同步慢车时低18%,但由于通过减燃料降低动力涡轮输出功的时间远长于发电机组甩负荷动作的时间,且燃气发生器减速还受到燃料调节阀开度限制,因此转速超调量必然更大,恢复时间也更长。

通过试验研究表明,改善机组突变负荷性能的较佳时间是在负荷突变后2s以内,此段时间燃气轮机输出功与负荷之间的功不平衡量较大,突变负荷后动力涡轮转速将以大斜率偏离正常发电工作转速,特别是甩负荷过程,若想满足发电标准要求,在保证燃机稳定工作的条件下,应以较快的调速率调整燃机输出功。试验过程中通过优化控制参数,使燃气轮机调速率在负荷突变1s以内达到限制值,及时的抑制了动力涡轮转速上冲或下降惯性,获得了良好的突变负荷发电性能。

4 结 论

本文采用容积法建立分轴燃气轮机发电模型,回避了计算时通过大量迭代过程求解非线性微分方程,节省了计算时间,满足实时性要求,同时计算结果与突变负荷试验时的动态特性基本吻合。

通过研究分轴燃气轮机发电机组突变负荷性能,得出初步结论如下:

1) 改善机组突变负荷性能的较佳时间是在突变负荷2s以内,在保证燃机稳定工作的条件下应尽可能快的使其调速率达到限制值。为了缩短动态响应时间,燃料调节阀全行程动作时间和控制响应时间应尽可能短,管路流阻应尽可能小。

2) 甩负荷时为了防止熄火,需增加最小燃料量限制,该限制值的大小将直接影响燃烧稳定性和动力涡轮转速超调量,试验研究表明该值可空载状态对应的燃料阀位低约18%。

3) 分轴燃气轮机的突减负荷性能明显优于突增负荷,这是由于加载时受压气机工作裕度限制,而减载时仅有熄火问题限制,因此在保证稳定燃烧的条件下可尽可能放开燃气发生器降转速率的限制。

4) 高工况突增和突减负荷性能均要优于低工况,有必要采取相关措施改善低工况的突变性

能。研究表明初始频率的提高有利于降低瞬态过程频率下垂量,因此在满足稳态发电品质要求的条件下,可适当提高起始工作频率,对于突减负荷则相反。

5) 串级三回路控制方案具有抗干扰能力强、控制速度快和自适应性好等优点,适用于突变负荷及甩负荷这样的强扰动系统。

参考文献:

- [1] Wildi T. Electrical machines, drives, and power systems [M]. State of New Jersey: Pearson Education, 2002.
- [2] 吴忠林. 船舶交流电力系统的短路电流 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [3] 林华峰. 船舶电站 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1998.
- [4] Al-hamdan Q Z, Ebaid M S Y. Modeling and simulation of a gas turbine engine for power generation [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006 12(8): 302-311.
- [5] Price B, Demers L, Lebel J F, et al. Enhancements to the load acceptance and rejection capability of a high pressure aeroderivative engine [R]. ASME Paper 2007-28100, 2007.
- [6] Camporeale S M, Fortunato B, Mastrovito M. A high-fidelity real-time simulation code of gas turbine dynamics for control applications [R]. ASME Paper 2002-30039, 2002.
- [7] Pearson D, Newman S. The development & application of the Rolls-Royce MT30 marine gas turbine [R]. ASME Paper 2011-45484, 2011.
- [8] 杨健. 舰船燃气轮机发电模块仿真研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所, 2011.
YANG Jian. Simulation of marine gas turbine power generation module [D]. Harbin: Harbin in Marine Boiler and Turbine Research Institute, 2011. (in Chinese)
- [9] 张磊. 间冷循环燃气轮机发电模块负荷突变半物理仿真研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所, 2013.
ZHANG Lei. Semi-physical simulation on loadsudden change of intercooled cycle gas turbine power generation module [D]. Harbin: Harbin in Marine Boiler and Turbine Research Institute, 2013. (in Chinese)
- [10] 黄开明, 周剑波, 刘杰, 等. 涡轴发动机起动过程的一种气动热力学实时模型 [J]. 航空动力学报, 2004, 19(5): 703-707.
HUANG Kaiming, ZHOU Jianbo, LIU Jie, et al. Thermodynamic model of turbo-shaft engine starting process [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(5): 703-707. (in Chinese)
- [11] 李淑英, 王志涛, 王建清, 等. 船用间冷循环燃气轮机供油规律仿真研究 [J]. 船舶工程, 2010, 32(5): 15-18.
LI Shuying, WANG Zhitao, WANG Jianqing, et al. Simulation study on fuel supply rate curve of marine inter-cooled gas turbine [J]. Ship Engineering, 2010, 32(5): 15-18. (in Chinese)

- [12] XIE Zhiwu, YU Jun, LIU Jinyang. Applying UML to gas turbine engines simulation[C]//Proceedings of the IEEE International Conference Technology of Object Oriented Languages and Systems. Nanjing:IEEE,1999:458-464.
- [13] 卫琛喻,臧述升.船舶电力推进三轴燃气轮机动态性能仿真及控制策略研究[J].中国造船,2012,53(4):184-191.
WEI Chenyu, ZANG Shusheng. Dynamic simulation and control strategy for three-shaft gas turbine in marine electric propulsion[J]. Ship Building of China, 2012, 53(4): 184-191. (in Chinese)
- [14] 刘尚明,寇可新,倪维斗.串级控制系统在燃机电站控制系统中的应用[J].清华大学学报,1997,37(增刊1):15-17.
LIU Shangming, KOU Kexin, NI Weidou. Research on cascade control applied to the gas turbine plant control system[J]. Journal of Tsinghua University, 1997, 37(Suppl. 1):15-17. (in Chinese)
- [15] 国防科学技术工业委员会. GJB730A/97 船舶燃气轮机通用规范[S].北京:中国标准出版社,1997:5-9.
- [16] Hannet L N, Khan A. Combustion turbine dynamic model validation from tests[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1993, 8(1):152-158.
- [17] Mello D. Dynamic models for combined cycle plants in power system studies[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1994, 9(3):1698-1708.
- [18] 张海波,孙健国,孙立国,等.一种涡轴发动机转速抗扰控制器设计及应用[J].航空动力学报,2010,25(4):943-949.
ZHANG Haibo, SUN Jianguo, SUN Liguu, et al. Design and application of a disturbance rejection rotor speed control method for turbo-shaft engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(4):943-949. (in Chinese)
- [19] 赵士杭,吕泽华,徐福生,等.燃气轮机的实时仿真[J].燃气轮机技术,1994,7(2):29-33.
ZHAO Shihang, LÜ Zehua, XU Fusheng, et al. Real-time simulation of gas turbine[J]. Gas Turbine Technology, 1994, 7(2):29-33. (in Chinese)

(编辑:叶青)