

基于功率前馈的燃气轮机可转导叶角度控制规律研究

闫旭,赫英辉,刘瑞,付正

(中国船舶集团有限公司第七〇三研究所,黑龙江哈尔滨 150078)

摘要:针对某型发电燃气轮机在负载突变过程中可转导叶角度与压气机转速互相耦合、控制失稳的问题,提出了“功率前馈”控制策略——即根据负载功率对可转导叶角度进行调整。首先,通过粒子群寻优算法,将压气机喘振裕度作为目标,对不同工况下的导叶角度进行寻优匹配;其次,采用“功率前馈”对燃气轮机突增负荷和甩负荷过程中的导叶角度进行调节;最后,以船用发电型间冷燃气轮机为研究对象,建立三转子燃气轮机整机模型,针对突变工况过程可转导叶角度的控制规律开展研究。结果表明:采用“功率前馈”控制模式,在突增负荷过程中,动力涡轮转速超调量减小11%,高压涡轮进口温度降低了3%;在甩负荷过程中动力涡轮转速超调量减少10%,高压涡轮进口温度超调量降低11.9%,低压压气机最小喘振裕度由0.87%提高至9.1%。

关键词:船用燃气轮机;间冷循环;可转导叶;控制规律

中图分类号:TK474⁺11 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.04.002

[引用本文格式]闫旭,赫英辉,刘瑞,等.基于功率前馈的燃气轮机可转导叶角度控制规律研究[J].热能动力工程,2022,37(4):9-15. YAN Xu, HE Ying-hui, LIU Rui, et al. Research on angle control law of gas turbine IGV based on power feedforward[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(4): 9-15.

Research on Angle Control Law of Gas Turbine IGV based on Power Feedforward

YAN Xu, HE Ying-hui, LIU Rui, FU Zheng

(No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: In order to solve the problems of the intercoupling and the control instability of the angle of the inlet guide vane (IGV) and the compressor speed of a certain type of power generation gas turbine in the process of abrupt load change, the "power feedforward" control strategy is proposed, and that is, the angle of the inlet guide vane is adjusted according to the load power. Firstly, by using the particle swarm optimization algorithm, the compressor surge margin is taken as the target, and the guide vane angles under different working conditions are optimized and matched. Secondly, the "power feedforward" is used to adjust the guide vane angle in the process of a sudden load increase and load shedding of gas turbines. Finally, taking marine power generation intercooled gas turbine as the research object, a whole model of the three-rotor gas turbine was established, and the control law of the guide vane angle was studied in the mutation process. The results show that the overshoot of the power turbine speed is reduced by 11% and the inlet temperature of the high pressure turbine is reduced by 3% during a sudden load increase by the "power feedforward" control mode. During load shedding, the overshoot of the power turbine speed is reduced by 10%, the overshoot of the high-pressure turbine inlet temperature is reduced by 11.9%, and the minimum surge margin of the low-pressure compressor is increased from 0.87% to 9.1%.

Key words: marine gas turbine, intercooling cycle, inlet guide vane, control law

引言

燃气轮机是船舶电网的主要动力源,其平稳安全运行是船舶电器设备正常工作的基本保证。在燃气轮机突增负荷和突卸负荷时,燃气轮机输出转速发生较大改变,导致发动机转速波动放大,同时也会引起较大的电压波动。为了使电网电压稳定,必须使发电机组快速回到正常工作转速,这就对燃气轮机的动态性能提出了更高的要求。目前,可转导叶系统是调节燃气轮机变工况稳定性的有效方法^[1]。其基本原理是:执行机构收到信号后,通过操纵环带动摇臂,使进口导叶和静叶的安装角向转子叶片转动的方向旋转,改变其出口气流角,使动叶进口气流以接近“零”攻角进入转子叶片,消除了叶背气流分离,防止喘振发生^[2]。

可转导叶的控制规律是变几何系统研究的重要内容,国内外学者进行了大量研究。郭荣^[3]研究了燃气轮机和联合循环可转导叶的控制策略,得到了不同负荷下可转导叶开度,并且考虑了环境温度对可转角度控制策略的影响,使燃气轮机在70%~100%负荷时效率明显提升。孙鹏等人^[4]通过多目标遗传算法得到了可调静叶的帕累托最优解,并分析了两种可调静叶的匹配方案,保证燃气轮机变工况后能够稳定运行,且喘振裕度提高了约4%。陈金伟等人^[5]针对燃气轮机-蒸汽轮机联合循环,对比分析了纯反馈、单前馈-反馈和双前馈-反馈3种可转导叶温度控制方式,通过调节可转导叶角度控制排气温度,以此保证余热锅炉的效率,得到了变负荷及不同环境温度扰动下的可转导叶控制规律。Hashmi等人^[6]以GE公司的LM1500三轴燃气轮机为研究对象,设计了可转导叶角度下漂移方案,使功率输出、热效率和喘振裕度分别提高了14.53%、5.55%和32.08%。此外,还考虑了压气机积垢和高进气温度两种恶劣条件的影响。

综上所述,目前工程上大多采用的可转导叶控制策略为“转速控制”,即可转导叶角度跟随压气机转速变化的方式进行控制。该方式可以保证不同稳态工况转速和导叶角度的良好匹配。但在负载突变过程中存在导叶角度与压气机转速互相耦合、控制失稳的问题,为此提出了“功率前馈”策略。本文将船用发电型间冷燃气轮机作为研究对象,建立燃气

轮机整机模型及可转导叶控制系统模型,基于“功率前馈”控制策略对可转导叶控制规律开展研究。

1 船用燃气轮机数学模型

1.1 结构组成

船用间冷燃气轮机主要部件包括低压压气机、间冷器、高压压气机、燃烧室、高压涡轮、低压涡轮和动力涡轮。该燃气轮机为三轴结构,低压压气机与低压涡轮相连,高压压气机与高压涡轮相连,动力涡轮与负载相连。其中,间冷系统用于冷却空气,提高部件效率。整机结构如图1所示。

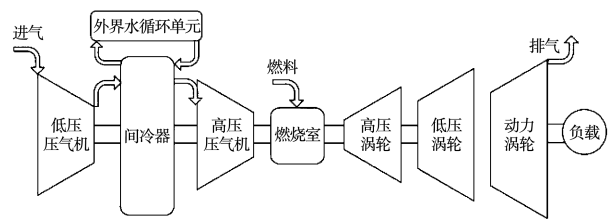


图1 船用间冷燃气轮机结构示意图

Fig.1 Structure diagram of marine intercooling gas turbine

1.2 仿真模型

1.2.1 压气机

压气机分为高压压气机和低压压气机,其原理是利用高速旋转的叶片对空气做功,从而压缩空气,增加进气量。压气机的工作特性由折合流量、压比、折合转速和效率共同决定,其数学模型为:

$$\frac{G_c \sqrt{T_{c,in}}}{P_{c,in}} = f_1(\pi_c, \frac{n_c}{\sqrt{T_{c,in}}}) \quad (1)$$

$$\eta_c = f_2(\pi_c, \frac{n_c}{\sqrt{T_{c,in}}}) \quad (2)$$

$$P_{c,out} = P_{c,in} \pi_c \quad (3)$$

$$P_c = G_c (h_{c,out} - h_{c,in}) \quad (4)$$

式中: $\frac{G_c \sqrt{T_{c,in}}}{P_{c,in}}$ —折合流量; π_c —压气机压比;

$\frac{n_c}{\sqrt{T_{c,in}}}$ —折合转速; η_c —压气机部件效率; $P_{c,in}$ 、

$P_{c,out}$ —压气机进、出口压力, Pa; P_c —压气机消耗功率, kW; $h_{c,in}$ 、 $h_{c,out}$ —压气机进、出口焓值。

1.2.2 燃烧室

由压气机压缩的高压空气到达燃烧室,与燃料混合燃烧做功,将燃料的化学能转化为热能。燃烧室的主要数学模型为:

$$G_{b,out} = G_{b,in} + G_f \quad (5)$$

$$G_{b,out} h_{b,out} = G_{b,in} h_{b,in} + G_f Q_u \eta_B \quad (6)$$

式中: $G_{b,in}$ 、 $G_{b,out}$ —燃烧室进、出口流量, kg/s; G_f —燃油量, kg/s; $h_{b,in}$ 、 $h_{b,out}$ —进、出口焓值; Q_u —燃料热值, kJ/kg; η_B —燃烧效率。

1.2.3 涡轮

涡轮与压气机原理相似,同样由折合流量、膨胀比、折合转速和效率4个参数共同确定工作特性。从燃烧室出来的高温气体到达涡轮,其过程近似绝热膨胀。最终,气体的热能转化为涡轮的动能。主要数学模型为:

$$\frac{G_T \sqrt{T_{T,in}}}{P_{T,in}} = f_3\left(\pi_T, \frac{n_T}{\sqrt{T_{T,in}}}\right) \quad (7)$$

$$\eta_T = f_4\left(\frac{G_T \sqrt{T_{T,in}}}{P_{T,in}}, \frac{n_T}{\sqrt{T_{T,in}}}\right) \quad (8)$$

$$P_{T,out} = P_{T,in} / \pi_T \quad (9)$$

$$P_T = G_{T,in} (h_{T,in} - h_{T,out}) \quad (10)$$

式中: $\frac{G_T \sqrt{T_{T,in}}}{P_{T,in}}$ —折合流量; π_T —涡轮膨胀比;

$\frac{n_T}{\sqrt{T_{T,in}}}$ —折合转速; η_T —涡轮部件效率; $P_{T,in}$ 、

$P_{T,out}$ —涡轮进、出口压力, Pa; P_T —涡轮膨胀功, kW; $h_{T,in}$ 、 $h_{T,out}$ —涡轮进出口工质焓焓值。

1.2.4 间冷器

冷侧流体:

$$G_l (h_{l,out} - h_{l,in}) + K_l A_l (T_w - T_{ml}) = G_l \frac{d h_{l,out}}{dt} \quad (11)$$

热侧流体:

$$G_h (h_{h,in} - h_{h,out}) - K_h A_h (T_{mh} - T_w) = G_h \frac{d h_{h,out}}{dt} \quad (12)$$

金属壁面:

$$K_h A_h (T_{mh} - T_w) - K_l A_l (T_w - T_{ml}) = m_w c_w \frac{d T_w}{dt} \quad (13)$$

式中: G_l 、 G_h —冷、热侧流体的流量; K_l 、 K_h —冷、热侧流体的传热系数; A_l 、 A_h —冷、热侧流体的换热面积; $h_{l,in}$ 、 $h_{l,out}$ —冷侧流体的进、出口焓值; $h_{h,in}$ 、 $h_{h,out}$ —热侧流体的进出口焓值; T_{ml} 、 T_{mh} —冷、热侧流体的平均温度; T_w —壁面的温度; T_{ml} 、 T_{mh} —冷、热侧流体的平均温度; m_w —芯体的质量; c_w —金属

的比热容。

对各个部件进行部件级建模,其中高/低压压气机、高/低压涡轮以及动力涡轮的部件特性曲线由各自的部件性能试验测得。将各模块进行组装,最终得到了船用发电型间冷循环三轴燃气轮机的整机模型^[7],其仿真模型如图2所示。

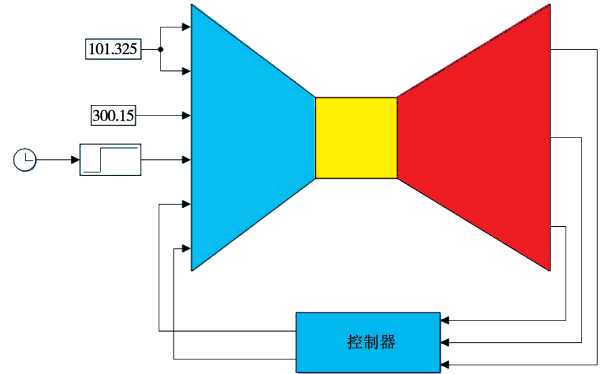
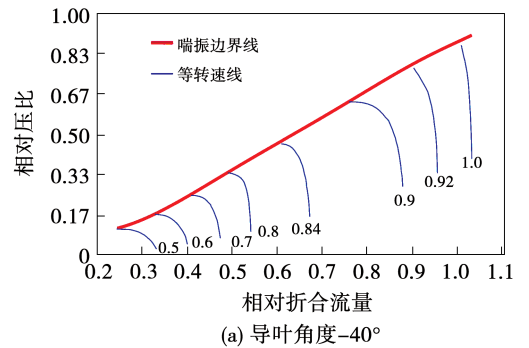


图2 船用间冷燃气轮机仿真模型

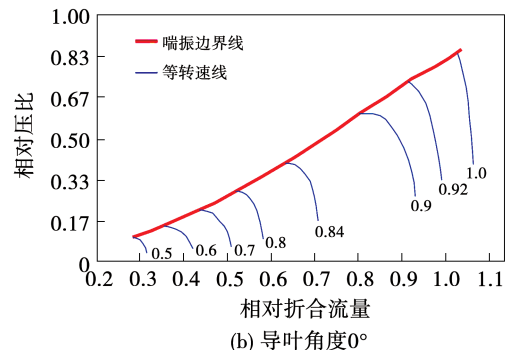
Fig. 2 Simulation model of marine intercooling gas turbine

1.3 压气机特性线

可转角度的变化将影响压气机特性线的变化。通过压气机部件试验,获取了可转导叶为 0° 和 -40° 的全工况压气机特性线,如图3所示。采用插值法,对中间角度特性线进行提取,将数值代入模型中进行计算。



(a) 导叶角度 -40°



(b) 导叶角度 0°

图3 压气机特性线

Fig. 3 Compressor characteristic line

2 可转导叶控制策略分析

为使燃气轮机在变工况时可以安全稳定运行,可转导叶的角度变化应该配合燃气轮机的工作状态进行调节。在目前工程上使用的“转速反馈”控制策略的基础上提出了“功率前馈”控制策略。

2.1 转速反馈控制

“转速反馈”控制策略,即通过试验、仿真和数据库查询等方法,获取压气机转速与导叶角度的匹配曲线,将压气机转速作为控制目标,可转导叶角度作为控制对象,将压气机转速信号实时反馈给可转导叶的执行机构,通过不断改变角度,达到与压气机转速实时匹配的目的,从而使燃气轮机整体效率提升^[8]。

在实际试验中,此控制方法出现了动力涡轮转速波动不稳定的现象。当负载出现较大功率的突变时,动力涡轮转速突然改变。为了使转速回到正常值,燃油系统增加或减少燃油供给量,同时又导致整机功率的变化,高低压压气机转速随之改变。此时,执行机构根据压气机转速将导叶角度进行实时调节,改善压气机喘振裕度。此方法的弊端在于,压气机转速改变影响可转导叶角度,导叶角度的变化改变了进气流量,又反过来影响压气机转速。控制目标和控制对象相互耦合,使控制效果变差。可见,“转速控制”策略无法在燃气轮机负载发生突变时使动力涡轮转速迅速稳定至正常值,达到发电机提供平稳电压的要求。

2.2 功率前馈控制

“功率前馈”控制策略是根据燃气轮机负载功率调节可转导叶角度。当燃气轮机负荷突变时,可以将负载功率信号传递给执行机构。执行机构根据收到的信号调整导叶角度,使导叶调整到最佳角度,有效避免了压气机转速和导叶角度相互耦合的情况,显著缩短了动力涡轮转速的稳定时间,使发电机尽快回到正常工作状态。

2.3 粒子群寻优算法

粒子群寻优算法(Particle Swarm Optimization, PSO)的基本思想是,通过模拟自然界生物群体行为来构造随机优化的算法^[9]。粒子群在 N 维空间中寻优,其搜索的过程如图 4 所示。图中, i 为粒子位

置, v 代表粒子速度, p_{best} 为局部极值, g_{best} 为全局极值, O 为全局最优值所在位置, v_1 是粒子向全局极值 g_{best} 方向的速度分量, v_2 是粒子向局部极值 p_{best} 方向的速度分量, v_3 是微粒自身的自由速度。在 3 个速度分量的共同作用下,粒子由位置 i_1 转移到位置 i_2 。下一时刻粒子将从位置 i_2 开始以同样的方式逐步向最优位置 O 处靠近,通过多次迁移迭代必然会到达全局最优位置 O 处,即找到最优解。

将得到的最优解作为转速反馈控制和功率前馈控制的最终导叶角度,以便比较不同控制策略所带来的影响。

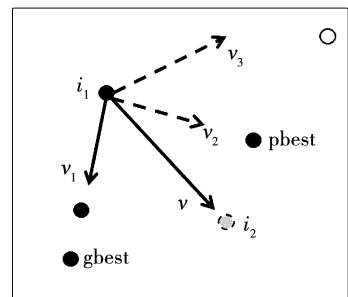


图 4 粒子群在 N 维空间中寻优过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of optimization process of particle swarm in N -dimensional space

利用粒子群寻优算法,结合压气机部件试验数据,设置低压压气机喘振裕度为目标函数,得到不同工况下可转导叶角度的最优解,如表 1 所示。其中,相对转速是指低压压气机实际转速与设计点转速之比。

表 1 可转导叶角度寻优结果

Tab. 1 The results of optimizing the angle of the IG V

负荷/%	导叶角度/(°)	相对转速/%
15.0	-40	71
22.5	-30	76
30.0	-20	81
37.5	-10	86
45.0	0	90

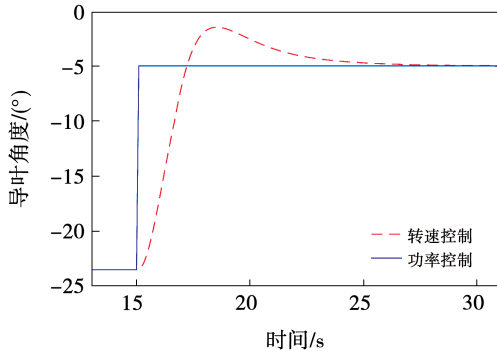
3 结果分析

以大气压力 101.325 kPa、环境温度 300.15 K 及海水温度 300.15 K 为边界条件,计算突增负荷和

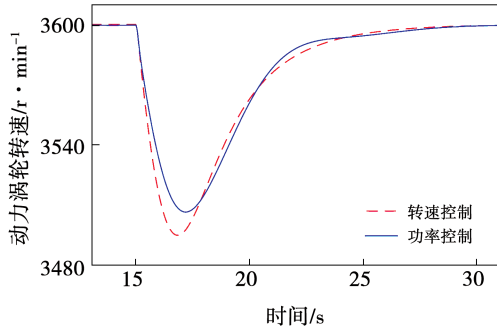
甩负荷变工况导叶角度、动力涡轮转速、高压涡轮进口温度以及低压压气机运行工作线。

3.1 突增负荷

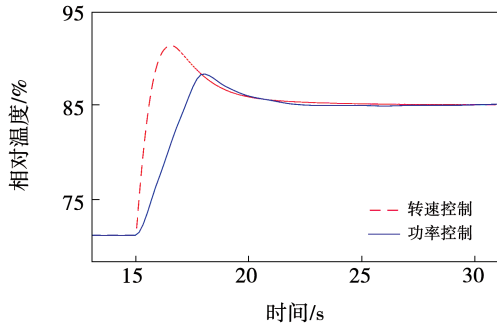
在燃气轮机突增负荷后,燃机参数变化曲线如图5所示。



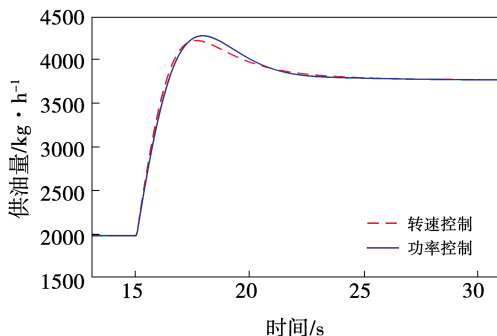
(a) 可转导叶角度变化



(b) 动力涡轮转速变化



(c) 高压涡轮进口温度变化



(d) 供油量变化

图5 负荷突增后的参数变化曲线

Fig. 5 Curves of parameter changes during load surge

由图5(a)可以看到,在突增负荷后,功率控制策略下的导叶角度立即做出响应;而转速控制策略下的导叶角度用时9.3 s完成响应,其主要原因为导叶角度和低压压气机转速相互耦合,使导叶转动时间延长。

由图5(b)可以看到,突增负荷导致动力涡轮转速降低。与转速控制策略相比,功率控制策略下动力涡轮转速的超调量减小了11%。这是由于导叶角度迅速与负载匹配,减少了与低压压气机转速耦合的时间。

由图5(c)可以看到,突增负载导致高压涡轮进口温度迅速升高,功率控制策略下最高温度降低了3%。这是由于在功率控制策略下,导叶收到突增负载信号,角度立即开大,进气量增加,然而燃油量无法迅速升高,致使进口处温度升高缓慢,避免了叶片受到较大热负荷冲击。

由图5(d)可以看到,当突增负载时,供油量也会随之上升。在功率控制策略下,燃油流量升高速率较慢、峰值更高。这是因为空气流量增大,需要的供油量增多,使动力涡轮转速回归额定转速。

低压压气机运行工作线的变化如图6所示。与转速控制相比,功率控制策略下负载突增的过程中,工作运行线距离喘振边界更远,喘振裕度增大。

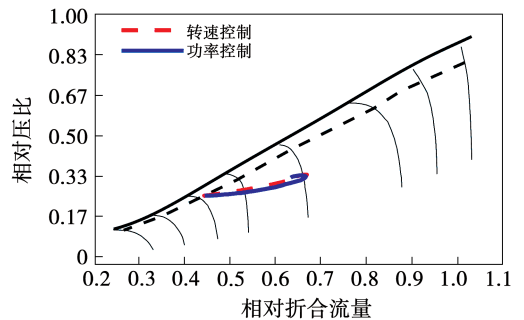


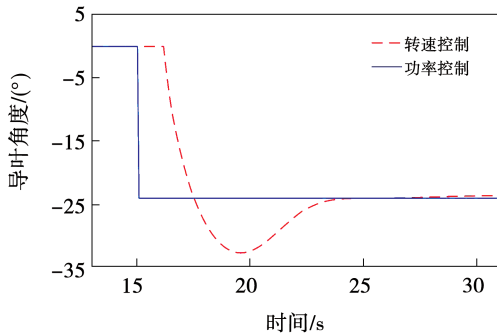
图6 负荷突增过程低压压气机工作线

Fig. 6 Running curves of the low pressure compressor during load surge

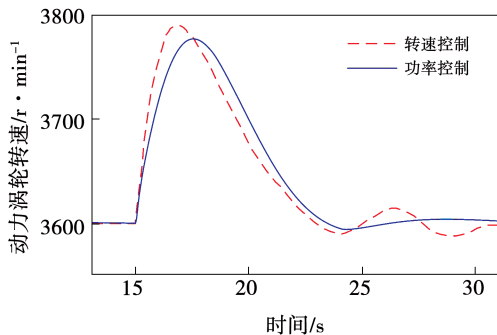
3.2 甩负荷

甩负荷过程两种控制策略下的参数变化曲线如图7所示。由图7(a)可知,可转导叶角度变化有较大不同。功率控制策略下导叶角度提前2 s开始响应。这是由于在转速控制策略下,燃气轮机在45%

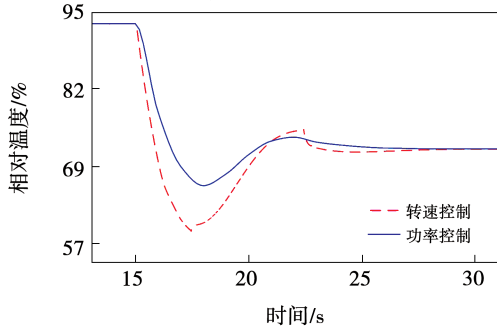
工况以上时,导叶角度始终为 0°,只有当工况降低到 45% 以下时导叶角度才会相应减小,而功率控制策略下的导叶角度会立即做出响应。



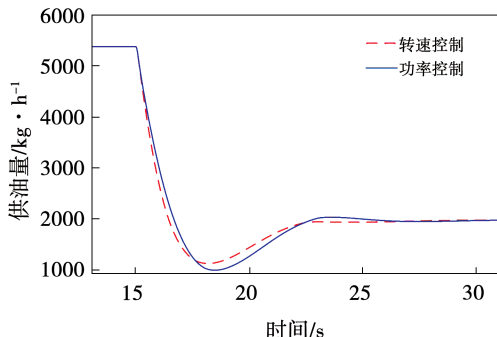
(a) 可转导叶角度变化



(b) 动力涡轮转速变化



(c) 高压涡轮进口温度变化



(d) 供油量变化

图 7 甩负荷后的参数变化曲线

Fig. 7 Curves of parameter changes during load shedding

由图 7(b)可知,甩负荷导致动力涡轮转速迅速增大。转速控制策略下动力涡轮转速超调量减小

10%,且功率控制策略下动力涡轮在恢复到规定转速后仍有波动。这是因为,受到导叶角度波动的影响在第 24.3 s 时导叶角度刚刚回调至最佳角度,此时动力涡轮仍处于波动状态,故稳定时间延长。

由图 7(c)可知,机组甩负荷之后高压涡轮温度迅速下降。在功率控制策略下,温度超调量减小了 11.9%,这是由于在负荷降低后燃油量也会减少,功率控制策略下导叶迅速关小,以防止进气流量过多导致燃烧室贫油熄火,所以温度变化较为平缓,有利于延长叶片使用寿命。

由图 7(d)可知,机组甩负荷之后,在功率控制策略下供油量下降更多。这是由于动力涡轮转速急剧升高,空气流量迅速下降,功率控制需要更小的供油量才可以遏制动涡轮转速升高。但是如果供油量过小,则有熄火的风险。

甩负荷过程低压压气机工作运行线如图 8 所示。在转速控制策略下,低压压气机最小喘振裕度为 0.87%;而在功率控制下,低压压气机最小喘振裕度增大至 9.1%。

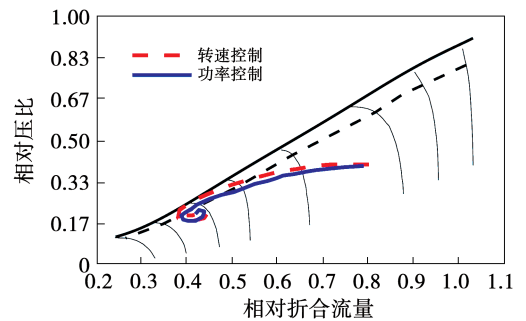


图 8 甩负荷过程低压压气机工作线

Fig. 8 Running curves of the low pressure compressor during load shedding

3.3 油气比

在机组进行突增/突卸负荷的过程中,燃油量和空气流量突变较大。若油气比过小,则容易发生贫油熄火,影响整机继续运行。试验测得该燃气轮机的熄火油气比,在燃气轮机运行过程中,若油气比低于该值将导致燃气轮机熄火。

图 9 为两种控制策略下突增负荷和甩负荷过程中油气比的变化规律。可以看到,两种过程油气比均高于熄火油气比,不影响整机继续运行。

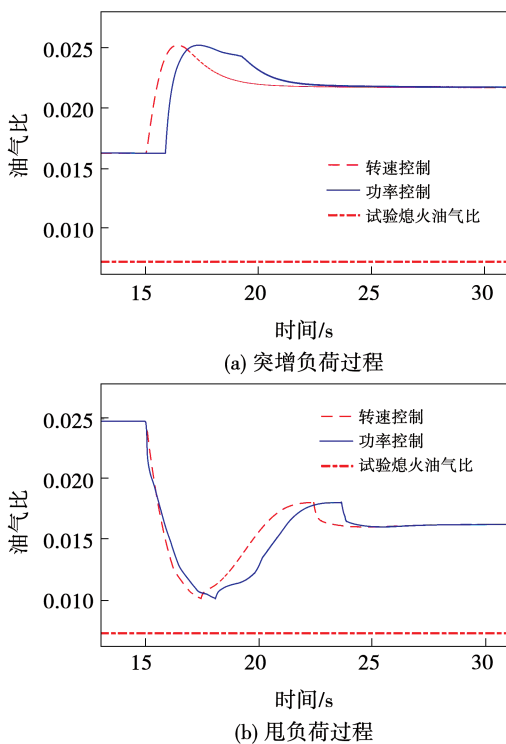


图9 两种突变过程油气比的变化

Fig. 9 The variation rule of oil/gas ratio in two kinds of mutation process

4 结论

以船用发电型间冷燃气轮机低压压气机可转导叶为研究对象,提出了“功率前馈”控制策略,与工程上常用的“转速反馈”控制策略进行对比分析,得出结论:

(1) 当机组负载突增时,与“转速反馈”控制策略相比,“功率前馈”控制策略下动力涡轮转速超调量减小了11%,可以快速回到稳定值;高压涡轮进口最高温度降低3%;低压压气机运行工作线距离喘振边界更远,喘振裕度增大。

(2) 当机组甩负荷时,功率控制策略下的动力涡轮转速变化超调量减小10%;高压涡轮进口温度超调量减小11.9%,叶片承受的热负荷减小,有利于延长使用寿命;低压压气机运行工作线最小喘振裕度由0.87%提高至9.1%,整机安全性大大提高。

(3) 为防止燃油流量与空气流量差值过大,计算突增和甩负荷过程中的油气比,结果显示,无论功率控制策略还是转速控制策略,油气比均高于熄火线,可以保证燃气轮机运行过程中不熄火。

参考文献:

- [1] 闻雪友,肖东明. IC 循环船用燃气轮机的可行性研究[J]. 热能动力工程,2009(1):60-64.
WEN Xue-you, XIAO Dong-ming. Feasibility study of intercooled cycle marine gas turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009(1):60-64.
- [2] 翁史烈,王永泓. 现代燃气轮机装置[M]. 上海:上海交通大学出版社,2015.
WENG Shi-lie, WANG Yong-hong. Advanced gas turbine engines [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2015.
- [3] 郭荣. 基于IGV控制的先进燃气轮机联合循环运行优化[J]. 动力工程学报,2020,40(6):469-474.
GUO Rong. Operation optimization of advanced gas turbine combined cycle units based on IGV control strategy [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(6):469-474.
- [4] 孙鹏,张君鑫,张善科,等. 船用燃气轮机压气机多级可调静叶优化匹配方法研究[J]. 热能动力工程,2021,36(5):40-48.
SUN Peng, ZHANG Jun-xin, ZHANG Shan-ke, et al. Research on optimization and matching method of multi-stage variable stator vanes for marine gas turbine compressor [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(5):40-48.
- [5] 陈金伟,陈梅珊,梅姣姣,等. 考虑环境温度和功率的燃气轮机进口可转导叶控制策略优化[J]. 上海交通大学学报,2016,50(4):540-544,550.
CHEN Jin-wei, CHEN Mei-shan, MEI Jiao-jiao, et al. Optimization of IGV temperature control strategy for gas turbine considering ambient temperature and load [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(4):540-544,550.
- [6] HASHMI M B, LEMMA T A, AHSAN S, et al. Transient behavior in variable geometry industrial gas turbines: a comprehensive overview of pertinent modeling techniques [J]. Entropy, 2021, 23(2):250.
- [7] TSOUTSANIS E, MESKIN N, BENAMMAR M, et al. Dynamic performance simulation of an aeroderivative gas turbine using the matlab simulink environment [C]//ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2013, 56246: V04AT04A050.
- [8] 王志涛,白冰,李铁磊,等. 考虑可调静叶压气机的船舶燃气轮机仿真优化[J]. 哈尔滨工程大学学报,2017,38(11):1721-1726.
WANG Zhi-tao, BAI Bing, LI Tie-lei, et al. Simulation optimization of marine gas turbine with VSV compressor [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(11):1721-1726.
- [9] 江维. 微粒群算法理论研究及其在PID参数优化中的应用[D]. 武汉:武汉工程大学,2010.
JIANG Wei. The theoretical research of PSO and its application in PID parameter optimization [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2010.