

大容量往复式与涡轮机组并列运行 稳定性分析

钱程¹ 周声结² 李天斌² 梁德炽² 米季炯³ 肖仕武³

(1. 中海油能源发展股份有限公司采油服务分公司, 广东 湛江 524057; 2. 中海石油(中国)有限公司
湛江分公司, 广东 湛江 524057; 3. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 海上石油平台发电机容量较小, 且大负荷容量与发电机容量接近, 系统抗冲击性能差。近年来低成本往复式发电机组的广泛使用, 使得暂态特性完全不同的往复式发电机组与涡轮发电机组并列运行越来越普遍, 将导致海上石油平台电力系统稳定性存在问题。基于PSCAD/EMTDC仿真平台, 对往复式发电机组与涡轮发电机组的调速系统建立了详细的模型, 对两种机组分别运行与并列运行时突加突卸负荷对系统稳定性的影响进行分析, 并将仿真结果与实际录波数据进行对比, 验证了模型的正确性。实验和仿真计算表明, 暂态特性完全不同的大容量往复式机组和涡轮机组并列运行, 在合理设置机组运行模型下进行负荷突加突卸测试时, 两台机组能够保持同步稳定运行。

关键词: 调速系统; 频率稳定; 往复式发电机组; 并列运行; 突加突卸

Stability analysis of large capacity reciprocating and turbine Generator parallel operation

QIAN Cheng¹, ZHOU Shengjie², LI Tianbin², LIANG Dechi², MI Jijiong³, XIAO Shiwu³

(1. CNOOC Energy Technology & Service-Oil Production Services Company, Zhanjiang 524057, China;
2. CNOOC Ltd. Zhanjiang Company, Zhanjiang 524057, China; 3. North China Electric Power University, Beijing
102206, China)

Abstract: The generator capacity of offshore oil platform is small, and the generator capacity is close to the large load capacity, resulting in poor system impact performance. Furthermore, the low-cost reciprocating generators are widely used, so it is inevitable that the reciprocating generators and the turbine generators run in parallel, which have completely different transient characteristics, these lead to a decrease in system stability. Based on the PSCAD/EMTDC simulation platform, detailed models are established for the speed regulation system of the reciprocating generator and the turbine generator. The influence of sudden load and sudden unload on the stability of the system is analyzed for single-unit operation and parallel operation of the units. And the simulation results are compared with the actual data. The correctness of the model and the stability of the system are verified, which lays a foundation for further research on the parallel operation of the units.

Key words: speed regulation system; frequency stability; reciprocating generator; parallel operation; load shading/Sudden loadin

0 引言

海上石油平台的电力系统不同于陆地电网, 它由自己的发电系统、配电中心及用电负荷系统组成, 必须满足海上油田生产工况下的用电需要。该系统自产自用, 且自成一体^[1]。这就使得海

上石油平台的电网容量相对较小, 某些大负荷容量与发电机容量接近, 抗冲击性能差, 导致整个系统的稳定性降低^[2-3]。燃气往复式发电机具有成本优势, 其越来越多被当作经济型机组应用, 但燃气往复式发电机组调节速度慢、带载能力差,

频率稳定性较差,影响整个平台电网的稳定性^[4]。因此,研究燃气往复式发电机组对平台电网稳定性的影响具有重要意义。

虽然燃气往复式发电机组带载能力差,但是其与大电网并列或与容量大很多的燃气涡轮机组并列运行,大电网或大容量燃气涡轮机组起稳定系统频率的主要作用,往复式机组的影响不大。但是如果燃气往复式发电机组与容量差不多的燃气涡轮机组并列运行时,在扰动后负荷的转移及分配过程中可能导致机组骤停情况的发生^[4-5]。鉴于以上情况,对燃气涡轮发电机组和燃气往复式发电机组并列运行时系统稳定性的分析尤为必要。

海油平台电力系统孤网运行,发生负荷突发卸时,有功不平衡会导致系统频率波动较大,甚至发生频率崩溃。文献[5-6]对燃气往复式发电机组与其他不同机组的并网特性进行了研究,通过实践证明了往复式机组可以与其他机组并网稳定运行,但是没有建立往复式机组调速系统模型,也没有从理论上进行说明。

本文基于某实际气田群开发工程项目,研究一台燃气涡轮发电机组(6 125 kV·A, 6.3 kV, 50 Hz)和一台燃气往复式发电机组(4 125 kV·A, 6.3 kV, 50 Hz)的并列运行稳定性。基于PSCAD/EMTDC仿真平台建立了二者调速系统的详细模型,分析了负荷突加突卸扰动对系统稳定性的影响。通过对机组转速、功率的仿真波形和实际数据的对比,验证了模型的正确性。平台在一台燃气涡轮发电机组与一台燃气往复式发电机组并列运行下进行了负荷突加突卸实验,并与建立的模型进行了对比,验证了模型的正确性及系统的稳定性,为二者并列运行情况的深入研究奠定了基础。

1 发电机调速系统模型及建立

为了控制原动机向发电机输出的机械功率,并保持电网的正常运行频率以及在各并列运行的发电机组之间合理分配负荷,每一台原动机都配置了调速器^[7-8]。调速系统的控制对发电机的有功

功率以及电力系统的频率有着决定性影响,其主要环节为调速器和原动机。

1.1 燃气涡轮发电机组调速系统模型

平台采用燃气涡轮机组,频率为50 Hz,对应的发电机的机轴转速为1 500 r/min,额定功率为4 400 kW。由于发电机的转速处于较低的水平,所以采用的是凸极发电机(三相、6线、Y形连接),励磁方面采用先进的无刷励磁机,发电机机身内部带有速度振动传感器。

燃气涡轮发电机组调速器模型中包括功率反馈、转速反馈两个环节,可以选择设置功率调度模式(恒功率和恒功率因数)、无差/孤岛运行(ISOCH)模式和有差/下垂(DROOP)模式。

1.2 燃气往复式发电机组调速系统模型

气田群开发工程项目电力系统配置的是往复式燃气发电机组,额定功率为3 300 kW,额定转速为1 000 r/min。

1.2.1 调速器模型

调速器一般由转速测量、功率测量和其给定环节、控制器以及相应的执行机构等部件组成。调速器工作原理:当负荷发生改变时,转速也相应变化,功率值和转速值的误差通过PID控制器后输出相应的电压值。此电压值控制执行机构输出相应的调节变量,从而作用于燃气机汽门调节进气量,使燃气机转速保持恒定,其模型如图1所示。

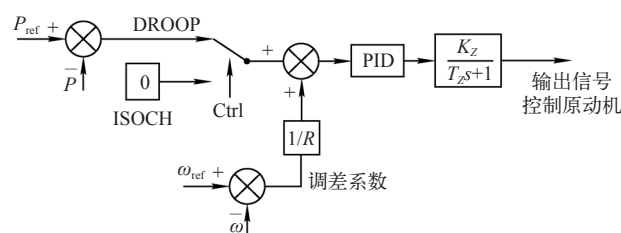


图1 往复式机组调速器模型

Fig.1 The model of governor for reciprocating generator

从图1看出,调速器可以通过切换开关来模拟不同的运行模式,分别为DROOP模式和ISOCH模式。DROOP模式的实质为一次调频,当系统负荷变化时,由于调速器的作用,原动机自动改变

燃料供应量,从而调整发电机的出力,同时负荷自身的调节效应也参与其中,但二者的共同作用仍无法使机组频率恢复初值。故DROOP模式为频率有差调节,此后还需能量管理系统(Power Management System, PMS)的控制,通过增减发电机组出力使频率恢复初值。DROOP模式包括功率环和转速环,其调节机理的公式为

$$\frac{1}{R_*} \Delta f_* + \Delta P_* = 0 \quad (1)$$

式中, R_* 为发电机组的调差系数; Δf_* 为机组频率(转速)给定值与实际值的差值; ΔP_* 为机组功率给定值与实际值的差值。

ISOCH模式以稳定频率为基准,无论负荷怎样变化,都可以维持基准频率不变,故ISOCH模式只含有一个转速环,为无差调节。

控制器一般采用PID控制器,其传递函数为

$$W_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

式中, K_p 为比例放大系数; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数。

执行环节是调速器的动作调节单元,一般用一阶比例惯性环节进行建模,其传递函数为

$$W_z(s) = \frac{K_z}{T_z s + 1} \quad (3)$$

式中, K_z 为比例放大系数; T_z 为执行环节的时间常数。

1.2.2 内燃机建模分析

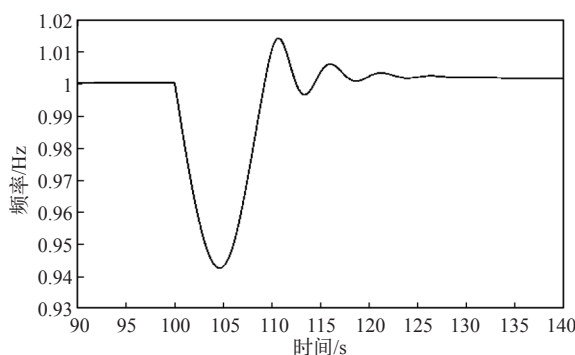
燃气往复机组的内燃机模型可简化为内燃机本体、供气系统、压气机、中冷器和涡轮等部分。其工作过程为:新鲜空气通过压气机增压后经中冷器进入内燃机燃烧室,与燃油混合燃烧后产生的废气经涡轮做功,最后经排气管排入大气。内燃机对外做功驱动负荷,由废气驱动的涡轮带动压气机继续压缩空气,如此往复循环^[9-10]。

PSCAD/EMTDC具有较强的自定义模块,基于其自定义模块用平均值法对内燃机本体、增压器和中冷器进行建模。

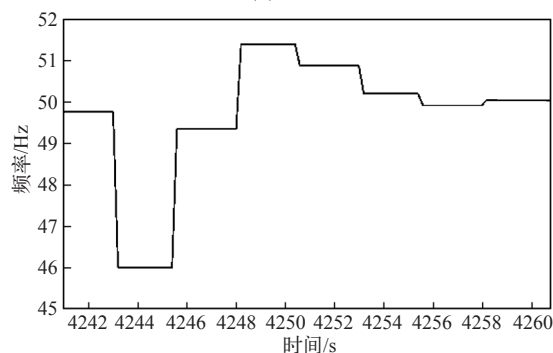
2 发电机单机运行突加负荷分析

2.1 燃气往复发电机组单机运行分析

在PSCAD模型中建立燃气往复发电机组单机带载系统,对此单机系统进行负荷突加测试。设功率因数为0.85,则机组额定负荷为3.5 MW,突加负荷设定为35%~60% (1.23~2.1 MW),此种工况下机组频率变化曲线以及实测波形如图2所示。



(a) 仿真波形



(b) 实测波形

图2 往复发电机突加负荷(35%~60%)频率变化曲线

Fig.2 The frequency curve of sudden load(35%~60%) for reciprocating generator

图2为往复发电机组单机系统突加负荷后频率变化曲线。当往复机组在突加负荷后,频率波动较大,跌落达到0.06 (pu)、3 Hz,并在20 s以内恢复到频率波动允许范围,机组稳定特性较差。

对比图2中的仿真计算结果与实际录波,两者波形变化趋势一致,验证了所建往复发电机组模型的正确性。

2.2 燃气涡轮发电机组单机运行分析

在PSCAD模型中设定负荷功率因数为0.85,

则燃气涡轮机组额定负荷为4.5 MW, 突加负荷设定为40%~60% (2.08~3.12 MW), 此种工况下机组频率变化曲线计算结果如图3所示。

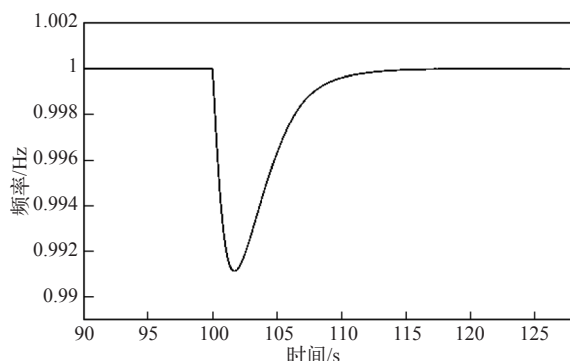


图3 涡轮发电机突加负荷（40%~60%）频率变化曲线
Fig.3 The frequency curve of sudden load(40%~60%) for turbine generator

从图3可以看出, 当涡轮机组在突加负荷后, 频率仅跌落0.01 (pu)、0.5 Hz以内, 并在10 s内恢复到额定频率, 机组稳定特性较好。

通过两种机组的对比可以看出, 相对于涡轮机组, 燃气往复式发电机组在近似相同扰动下, 频率波动更大, 频率恢复时间更长, 调速器调节过程时间长, 机组稳定特性较差。

3 大容量往复式与涡轮机组并列运行突加突卸负荷分析

平台电力系统在正常运行方式下存在1台燃气涡轮发电机组与1台燃气往复式发电机组并列运行方式, 此时当最大的负荷电动机2 240 kW压缩机出现突卸突加以及发生短路故障等扰动后, 可能会造成系统失稳。在实验中, 对1台往复式发电机和1台涡轮发电机并列运行时负荷突加突卸情况进行实际测试。根据PMS运行情况, 往复式发电机处于调度模式, 涡轮发电机处于DROOP模式。系统初始运行工况为带负荷1 500 kW, 其中往复式发电机带负荷800 kW, 涡轮发电机带负荷700 kW。进行负荷突加测试时每次加负荷1 100 kW, 按两次进行加负荷测试, 负荷突卸测试时按1 500 kW减负荷。

基于PSCAD/EMTDC仿真软件建立了往复式发电机组与涡轮机组并列运行方式, 同样对负荷

突加突卸进行了仿真测试。

3.1 突加负荷测试

负荷突加测试时每次加负荷1 100 kW, 按两次进行加负荷测试, 由于两次加负荷测试机组的暂态过程相同, 故只对第一次加负荷1 100 kW进行分析计算, 此过程机组转速和功率变化曲线如图4和图5所示, 并与往复式发电机组转速和功率实测曲线进行对比。

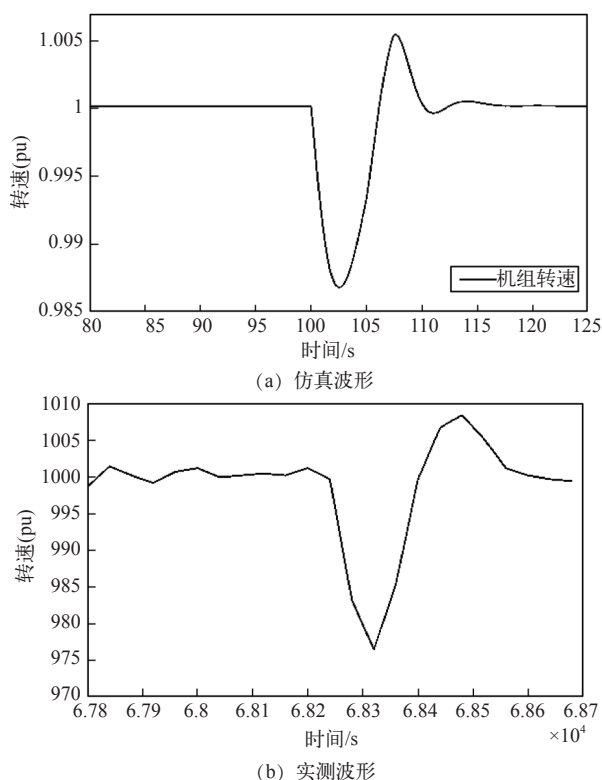


图4 突加负荷1 100 kW转速变化曲线

Fig.4 The speed curve of sudden load(1 100 kW)

从图4a可以看出, 在突加负荷后, 由于往复式机组和涡轮机组电气紧密联系, 故二者转速基本一致, 转速跌落仅为0.015 (pu), 并在10 s左右恢复到频率波动允许范围, 与图4b实测波形基本吻合, 验证了所建模型的正确性。同时也说明相比机组单机运行, 往复式机组与涡轮机组并列运行提高了系统稳定性。这是由于涡轮机组调节速度快, 提高了系统整体稳定性。图5a表明往复式机组比扰动前多出力300 kW, 与图5b往复式机组实测波形吻合较好, 剩下的800 kW负荷由涡轮机组承担, 根据PSCAD仿真模型计算结果也得到了验证。

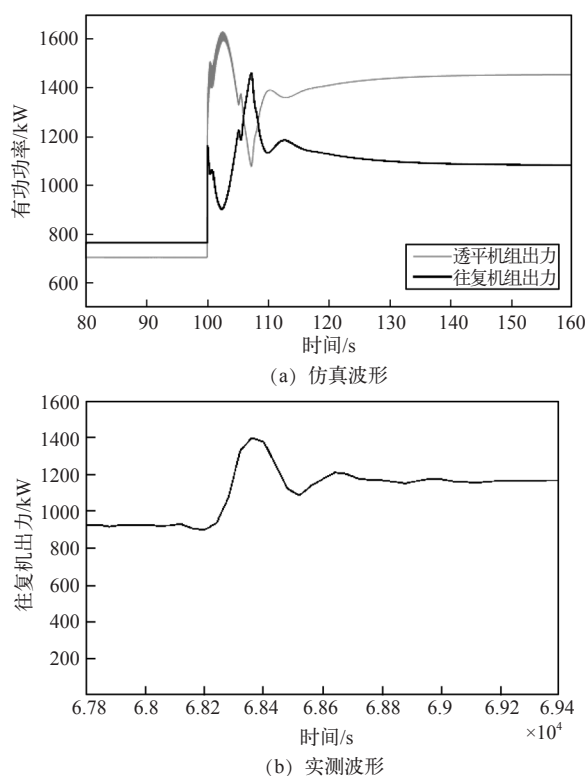


图5 突加负荷1 100 kW功率变化曲线

Fig.5 The active power curve of sudden load(1 100 kW)

3.2 突卸负荷测试

在连续两次加载1 100 kW的前提下进行突卸负荷1 500 kW测试，此过程机组转速变化曲线如图6所示。

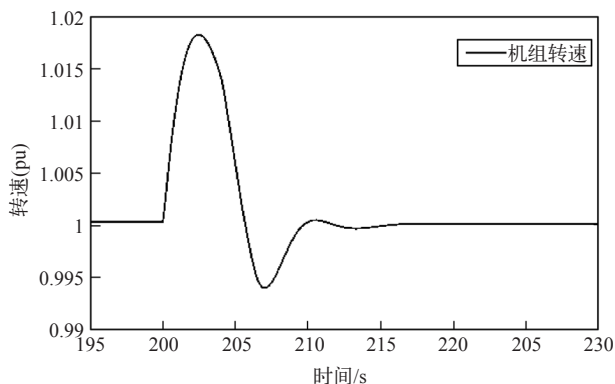


图6 突卸负荷1 500 kW转速变化曲线

Fig.6 The speed curve of sudden unload(1 500 kW)

从图6可以看出，在突卸负荷后，机组转速升高0.02 (pu)，并在10 s左右恢复到频率波动允许范围，系统稳定性较高。

通过以上分析可以看出，两机组并列运行进行负荷突加突卸测试时，虽然二者暂态特性完全

不同，但系统仍然是稳定的。

4 结束语

本文基于某气田群开发工程项目建立了燃气往复式发电机组、燃气涡轮发电机组暂态分析模型，尤其是对二者的调速系统进行了建模，针对机组单机运行以及并列运行两种情况负荷突加突卸进行了仿真计算，并分析了系统的暂态稳定性问题。

1) 基于PSCAD/EMTDC仿真软件建立了燃气往复式发电机组及调速器系统的详细模型，分别针对涡轮机组、往复式机组在单机运行时的负荷突加情况进行了仿真计算，并将仿真计算结果与实测结果进行了对比，两者波形基本一致，验证了所建模型的正确性。

2) 单机运行时，在近似相同扰动下，燃气往复式发电机组频率波动更大，频率恢复时间更长。燃气往复式发电机组响应慢，带负荷能力差，突加突卸时负荷波动大，稳定性较差。

3) 两台暂态特性完全不同的大容量往复式机组和涡轮机组并列运行，在合理设置机组运行模型下进行负荷突加1 100 kW和负荷突卸1 500 kW测试时，两台机组能够保持同步稳定运行，并且系统稳定性较好，为二者并列运行情况的深入研究奠定了基础。

参考文献

- [1] 毛晓昀. 船舶电力系统单机运行工况下的控制与仿真[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
MAO Xiaoyun. Control and simulation of ship power system under single machine operation[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.
- [2] 郑俊和, 史步海. 船舶发电机组负荷突加突卸测试系统设计[J]. 中国测试, 2011, 37(2): 58-61.
ZHENG Junhe, SHI Buhai. Design of sudden load and unload test system for marine generators[J]. China Measurement & Test, 2011, 37(2): 58-61.

- [3] 李强, 李鑫, 魏澈. 海上油气田群电力组网技术[J]. 中国造船, 2011, 52(增刊): 218-223.
LI Qiang, LI Xin, WEI Che. Power grid interlinking technology for offshore oil fields[J]. Shipbuilding of China, 2011, 52(Sup): 218-223.
- [4] 王树达. 基于不同暂态特性发电机组的海洋平台电力系统暂态稳定研究[J]. 电气时代, 2017(4): 53-56.
WANG Shuda. Study on transient stability of offshore platform power system based on generators with different transient characteristics [J]. Electric Age, 2017(4): 53-56.
- [5] 穆胜军, 李桂忠, 谭静轩. 国产低压往复天然气发电机组在我国海上油田的应用经验及效果[J]. 中国海上油气, 2014(8): 74-79.
MU Shengjun, LI Guizhong, TAN Jingxuan. Application experience and effect of domestic low-pressure reciprocating natural gas generator sets in China offshore oilfields[J]. China Offshore Oil and Gas, 2014(8): 74-79.
- [6] 王彪, 李汪洋, 秦立成, 等. 涡轮与往复式发电机的组网调试方法研究[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(1): 132-133.
WANG Biao, LI Wangyang, QIN Licheng, et al. Research on networking debugging method of turbine and reciprocating generator[J]. China Water Transport(Second half of the month), 2018, 18(1): 132-133.
- [7] 刘笙, 朱子述, 艾芊, 等. 电气工程基础[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 26.
- [8] 李岩松, 齐郑, 刘君. 电力系统自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 90.
- [9] 陈永强. 绥中36-1海上油田群电站并网发电机控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
CHEN Yong Qiang. Research on generator control in power stations of SZ36-1 offshore oil field group[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [10] 张明. 基于dSPACE的柴油机电子调速系统建模与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
ZHANG Ming. Modeling and simulation of electronic governor of diesel engine based on dSPACE platform[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.

作者简介

钱程

钱程(1972-), 男, 湖南邵阳人, 大学本科, 热能工程专业, 电气工程师。

(收稿日期: 2018-07-03)

EA