

[发电机]

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

文/海洋石油工程股份有限公司 王树达

利用EDSA电力系计算软件，对海洋平台中燃气往复式发电机组与燃气透平发电机组并列运行的工况，进行了电力系统暂态稳定性分析，结合对主机切机、切负荷、三相短路故障的模拟图形及数据，给出了电力系统稳定性控制的策略。同时，为电力系统的稳定控制策略提供了基本的数据支撑。

由于海洋平台的开发受国际油价低迷，投资成本缩水的大背景影响，海洋石油开发中，对于电站的选型越来越多的采用主力机型搭配经济机型的方式进行配置，由于燃气往复式发电机的成本优势，使其越来越多低被当作经济机型来使用。

但由于燃气往复式发电机组的带载能力差，对负荷扰动的适应能力也较差，而造成整个电力系统的稳定性降低，使其成为电力系统稳定的短板。因此，在这种背景下，在海洋平台电力系统方案设计中，对电力系统进行暂态稳定性分析就显得十分重要。本文使用EDSA电力系计算软件，分析了切机、切负荷、三相短路等故障对整个电力系统的影响，并给出安稳策略。

项目概况及主要参数

1. 项目概况

本文的研究对象是南海某海洋石油平台，平台设有独立主电站（不与外围平台进行组网），包括两台现场功率4 400 kW的燃气透平发电机（6.3 kV，50 Hz，三相三线中性点绝缘）和一台3300 kW的燃气往复式发电机（6.3kV，50 Hz，三相三线中性点绝缘）。平台上还设有2台2 500 kV·A，6.3/0.4 kV降压变压器为平台低压设备供电。

平台主要设备包含3台1 800 kW的湿气压缩

机、2台1 800 kW的干气压缩机、1台500 kW的低压螺杆压缩机和400 kW的海水提升泵等。

2. 设备参数

主变压器的参数详见表1。

表1a 电动机与变压器匹配

名称	变压比	容量/kV·A	分接头
CEP-TR-001	6.3/0.4	2 500	$\pm 2 \times 2.5\%$
CEP-TR-002	6.3/0.4	2 500	$\pm 2 \times 2.5\%$

表1b 变压器参数表

名称	空载损耗 /kW	短路损耗 /kW	短路电压 (%)	空载电流 (%)
CEP-TR-001	3.6	18.0	6	0.39
CEP-TR-002	3.6	18.0	6	0.39

计算中，发电机均采用 E_d' ， E_q' ， E_d'' ， E_q'' 模型。发电机参数如表2所示。

表2a 燃气往复式发电机参数表（CEP-GEG-7001）

额定容量 S_G /kV·A	额定有功功率 P_G /kW	额定无功功率 Q_G /kvar	功率因数 $\cos \varphi$	额定电压 U_G /kV	额定电流 I_{GN} /A	额定频率 f_N /Hz	转速/ (r/min)
4 625	3 700	3 113	0.8	6.3	423.9	50	1 500
X_d (pu)	X_q (pu)	X_d' (pu)	X_q' (pu)	X_d'' (pu)	X_q'' (pu)	X_0 (pu)	X_2 (pu)
1.7144	0.9656	0.2412	0.9656	0.1555	0.2724	0.109	0.2058
T_{d0}' (s)	T_{d0}'' (s)	T_{d0}''' (s)	T_{q0}'' (s)	T_a (s)	H (s)		
5.939	1.185	0.059	0.030	0.165	1.2		

表2b 燃气透平发电机发电参数 (CEP-GTG-7001A/B)

额定容量 S_G /kV·A	额定有功功率 P_G /kW	额定无功功率 Q_G /kvar	功率因数 $\cos\varphi$	额定电压 U_G /kV	额定电流 I_{GN} /A	额定频率 f_N /Hz	转速/ (r/min)
6 000	4 800	3 600	0.8	6.3	549.9	50	1 500
X_d (pu)	X_q (pu)	X_d' (pu)	X_q' (pu)	X_d'' (pu)	X_q'' (pu)	X_0 (pu)	X_2 (pu)
2.183	1.15	0.221	1.15	0.155	0.259	0.106	0.207
T_{d0}' (s)	T_{q0}' (s)	T_{d0}'' (s)	T_{q0}'' (s)	T_a (s)	H (s)		
5.943	1.188	0.059	0.030	0.124	1.2		

3. 控制模型

计算中, 燃气透平发电机组调速器参考模型如图1a所示, 燃气往复发电机组调速器参考模型如图1b所示。

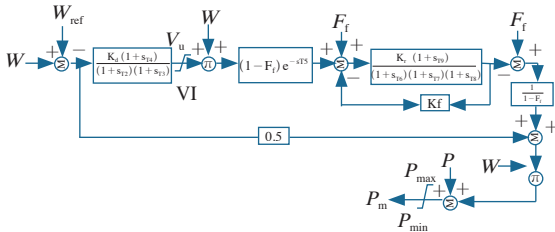


图1a 燃气透平发电机组调速器模型图

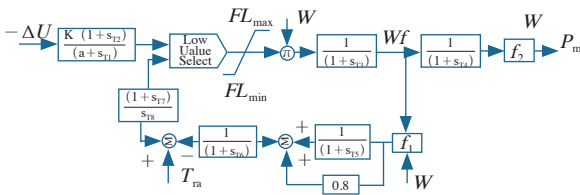


图1b 燃气往复发电机组调速器模型图

计算中, 燃气透平发电机CEP-GTG-7001A/B及燃气往复发电机组CEP-GEG-7001的励磁机模型均选取具有副励磁机的交流励磁机系统简化模型(加微机调节器), 模型如图2所示。

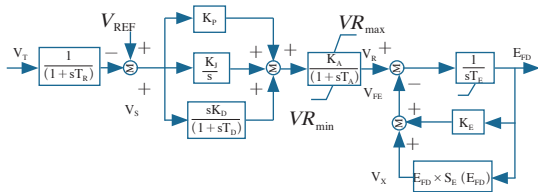


图2 励磁机参考模型图

计算中使用了如下的负荷模型:

1) 6.3 kV电压等级母线上负荷100%异步电动机负荷的模型。其中电动机模型采用典型一阶机械模型。

2) 0.4 kV母线上的负荷模型大部分采用30%恒阻抗负荷、40%恒电流负荷、30%恒功率负荷的

模型, 对于负荷中电动机负荷占比值较大的0.4 kV母线负荷, 采用电动机负荷与恒阻抗负荷的综合负荷模型, 其中电动机负荷所占比例为实际比例, 具体参数计算与1)中所述相同, 其余负荷视为恒阻抗负荷。

计算情况及结果分析

1. 系统运行方式和故障方式综述

计算中系统运行方式均为夏季方式, 计算中仅对1台燃气透平发电机和1台燃气往复发电机组并列运行的工况进行了分析。

同时, 计算中故障类型主要选取平台电力系统关键节点的三相短路故障、单台发电机突然切除及负荷的突然切除情况下电网运行的稳定性。

具体故障及其编号等见表3所示。

表3 故障地点与类型表

故障编号	具体故障地点和故障类型	故障类型和动作
1	中压盘CEP-MV-001与湿气压缩机电动机CEP-X-2501A之间电缆三相短路	$f^{(3)}$, 0.15 s后故障切除
2	发电机CEP-GTG-7001B故障退出	发电机故障退出, 0.15 s后甩负荷
3	将湿气压缩机CEP-X-2501A故障停机	—

注: 所有故障均发生在线路两侧继电保护装置的主保护范围之内。

实验数据分析

计算基于表3所示的系统的3种典型故障进行了计算。表4给出了各个故障类型的发电机功角稳定结果。计算给出的发电机摇摆曲线统一以CEP-GTG-7001B发电机为参考发电机。

表4 稳定计算结果

运行方式	故障切除时间/s	稳定情况	最大摇摆角度/ (°)	极限切除时间/s (E_d' , E_q' , E_d'' , E_{q1} 模型)
透平+1往复式	1 0.15	稳定	-20.9	>2 s
	2 0.15	临界稳定	—	0.44 s
	3 0	稳定	-5.79	>2 s

注: 对于极限切除时间大于2 s的故障情况

考虑到继电保护设备的动作时间都小于该时间, 故不计算准确的极限切除时间。对于极限切除时间小于2 s的, 稳定状态均定义为“临界稳定”。

典型输出数据分析

下面分别对3种故障方式进行计算，并给出计算输出结果。

故障方式1：湿气压缩机电机CEP-X-2501A与母线CEP-MV-001之间发生三相短路（第2秒），经0.15 s后切除故障，故障消除。结果表明，故障后，透平发电机组和燃气往复发电机组在第5.06 s后频率波动能够稳定在额定频率的-1%的范围内。

具体计算输出如下如图3a~e所示。

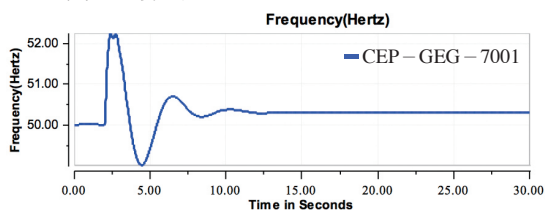


图3a CEP-GEG-7001频率波动曲线

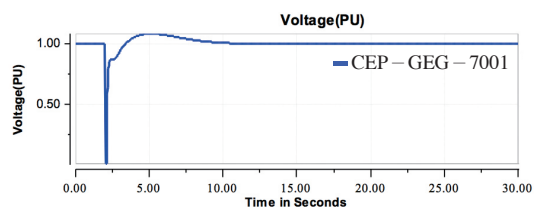


图3b CEP-GEG-7001电压波动曲线

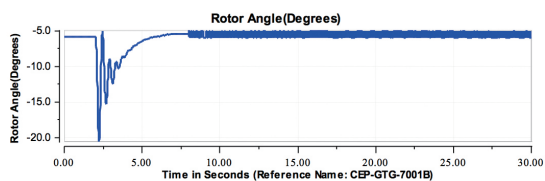


图3c CEP-GEG-7001功角波动曲线

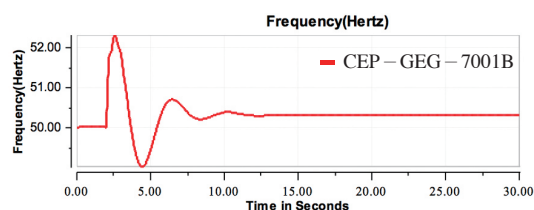


图3d CEP-GEG-7001B频率波动曲线

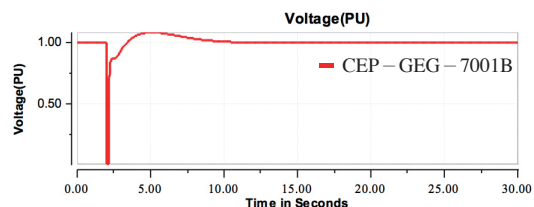


图3e CEP-GEG-7001B电压波动曲线

故障方式2：发电机CEP-GTG-7001B故障退出（第2秒），同时，在发电机故障退出后的0.15 s执行甩负荷操作，由于只有1台主机运行，所以，不涉及发电机功角稳定的问题。故障后，燃

气往复发电机组在第4.1 s后频率波动能够稳定在额定频率的-1%的范围内。

具体计算输出如图4a~c所示。

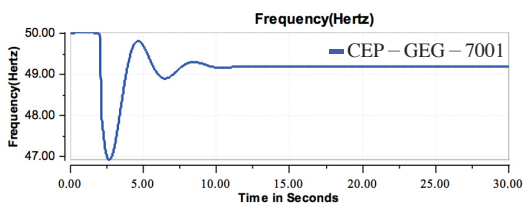


图4a CEP-GEG-7001频率波动曲线

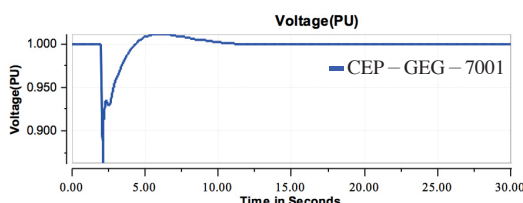


图4b CEP-GEG-7001电压波动曲线

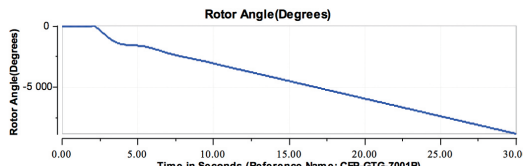


图4c CEP-GEG-7001功角波动曲线

故障方式3：将湿气压缩机CEP-X-2501A（1 800 kW）正常停机（第2秒）。结果表明，故障后，透平发电机组和燃气往复发电机组的频率能够一直稳定在额定频率的+1%的范围内。

具体计算输出如图5a~e所示。

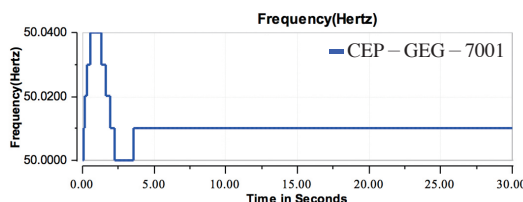


图5a CEP-GEG-7001频率波动曲线

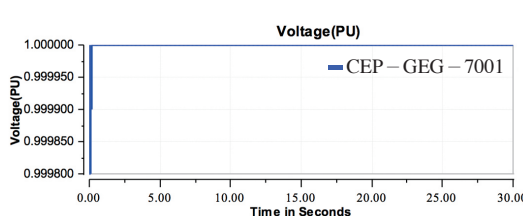


图5b CEP-GEG-7001电压波动曲线

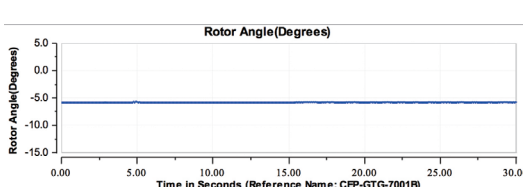


图5c CEP-GEG-7001功角波动曲线

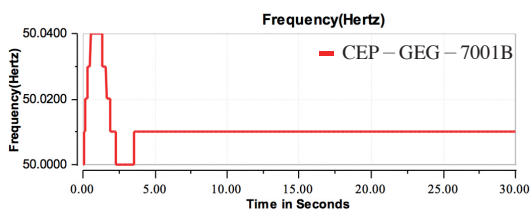


图5d CEP-GEG-7001B频率波动曲线

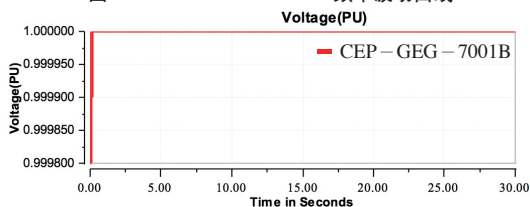


图5d CEP-GEG-7001B电压波动曲线

结束语

分别对上述3类故障对系统的影响进行总结如下：

（1）三相短路故障

计算中针对对发电机影响最大的6.3 kV系统和
中压压缩机电机靠近发电机侧的线路进行了三相
短路仿真分析，通过仿真结果可以看出，系统在
设定的故障切除时间切除后均能够稳定运行。

（2）大负荷故障退出

计算中对中压母段的大电动机进行了故障切
除仿真，从仿真的结果来看，在经过突然掉负荷
后，系统能够稳定运行。

（3）发电机故障停机

计算中对一台主机故障（透平故障）的情况
进行了分析，从仿真结果来看，1台燃气透平发
电机突然切机退出后，整个系统只剩1台燃气往复

式发电机提供电力，发电机的频率会迅速降低，要
维持系统的稳定，需要在发电机频率降幅小于10%
前将系统恢复到稳定值。需要特别关注故障切除
的极限为440 ms，考虑到电站管理系统执行优先脱
扣的固有时间一般在100 ms到200 ms之间，所以，
电站管理系统的动作时间能够满足极限切除时间
的要求，能够保证系统稳定。

通过对上面三类故障的分析，可以看出，整
个电力系统在发生严重的系统扰动时，虽然能够
通过保护装置及时动作和电站管理系统的及时甩
负荷操作使系统趋于稳定。但也存在极限切除时
间短、频率、电压波动大的现象，所以，对于2种
不同特性机组的并列运行，在系统设计中还应该
考虑如下几个方面的设计。

（1）燃气往复发电机组个别工况的极限切
除时间较短，电站管理系统能够快速可靠动作将
决定整个电力系统的稳定，所以，在电站管理系
统设计中，必须对电站管理系统的响应时间进行
要求，建议要求动作完成时间不能超过150 ms。

（2）对于大负荷，如石油平台常用的压缩
机、海水泵等设备，应该配置软起动器或变频
器，以减少负荷的投切对电力系统稳定的影响。

（3）大型变频器的前端应该配置预充磁装
置，以减少变频器中移相变压器的空载合闸电流
冲击。EA

（收稿日期：2016.07.18）

（编辑：白文亭）

