

应对港口瞬变负荷的蓄能柴油发电机组电站的设计

楚万秀, 卫冬生, 马宁, 曾宪友
(七一一研究所, 上海 200090)

摘 要: 针对港口码头卸船机工作时产生频繁周期性大冲击负荷的特点, 自主研发了蓄能柴油发电机组备用电源。试验验证了该蓄能柴油发电机组在满足港口设备对电品质要求的同时, 改善了机组的运行工况; 提高了轴系的疲劳寿命; 实现了电站的经济运行。
关键词: 柴油发电机组; 蓄能装置; 冲击负荷
中图分类号: U653.95 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2012)05-0036-03

Design of Diesel Gensets for Impact Load in Port with Energy Storage Device
Chu Wanxiu, Wei Dongsheng, Ma Ning, Zeng Xianyou

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Insittute, Shanghai 200090)

Abstract: Energy storage diesel gensets were developed as a solution of standby power for port unloader machines that were working with frequent and cyclical big impact load. Test results show that the solution not only met the requirements for the quality of power supply, but also improved the working condition of the gensets, enhanced the fatigue endurance of the shaft of the gensets, and realized the economic operation of power plant.
Keywords: diesel genset; energy storage device; impact load

0 引 言

港口对于城市经济的发展、区域经济的发展都起着非常重要的作用。大量的货物聚集在港口, 港口就变成了资源中转的枢纽。保证港口正常供电, 使得港口各设备正常运行, 对促进经济的发展具有非常重要的意义。

装卸设备是港口的硬件设施, 这些设备的工作方式使得港口用电负荷很不稳定, 复杂多变: 提升货物时的突加冲击负荷, 稳定运行的平稳负荷, 下放货物时的突卸负荷; 同时平稳负荷也在不断变化, 冲击负荷更是瞬态多变。对于港口这类瞬变类负荷, 运行于大容量电网一般较为稳定; 但在应急供电状况下, 采用小容量备用电站供电时, 一般做法是通过增大备用电站容量来满足港口这类特殊用电负荷的要求。据相关文献资料, 要达到电网电压波动小

于 $\pm 7\%$, 频率不低于 48.5 Hz(50 Hz)的目标, 系统的冲击负荷不应超过机组剩余容量的 30%。通过这种方式来应对冲击负荷主要有以下两个弊端: 1) 因电站总装机容量大, 机组在低于额定负荷的工况下运行, 油耗高, 经济性差; 2) 机组功率频繁突加突卸, 机组轴系扭矩冲击剧烈, 影响了轴系疲劳寿命。

大容量冲击负荷的投入或退出引起电网有功、无功突变^[1], 一方面可导致发电机母线电压和机组频率的较大波动, 在冲击较为严重的情况下, 机组母线电压及频率的波动会引起机组励磁系统电压/频率保护动作跳开机组^[2]; 另一方面, 冲击负荷引起的较大有功冲击将对附近的发电机组造成剧烈的暂态扭矩冲击作用, 可能激发轴系上一个或几个扭振模态的振荡响应^[3]。

如何经济高效的满足港口这类用电负荷的需要对经济发展和环境保护有着重要的意义, 同时顺应

了绿色低碳的潮流。

本文通过某港口备用柴油发电机组电站工程实例介绍了一种通过蓄能机组来应对港口码头频繁大冲击负载的电站设计方法。从经验计算到建立模型、仿真计算到最后的试验验证，详细介绍了整个设计过程，并通过负荷试验验证了此设计方法的准确性和实用性。

1 工程介绍

某港口为解决故障停电造成的巨额经济损失，建设了一个小型柴油发电机组电站，在 6 000 kW 平稳负载，两台卸船机同时工作 7 000 kW 冲击负荷工况下，满足电压波动小于 ±7% (6 300 V)，频率波动在 48.5 ~ 51 Hz (50 Hz) 的要求。单台卸船机的负载图如图 1 所示。

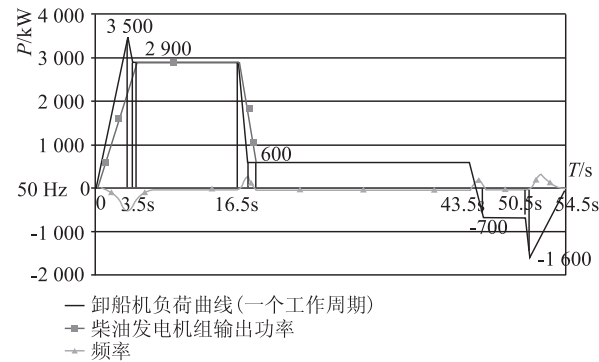


图 1 负荷曲线、柴油发电机组输出功率、频率曲线

2 蓄能柴油发电机组电站设计

针对卸船机周期性大冲击负荷，设计了容量 14 MW 蓄能机组电站(图 2)。电站由 7 台蓄能机组组成，每机组功率 2 000 kW，由柴油机、发电机和蓄能系统组成，蓄能系统串接于柴油机和发电机组轴系中。这种蓄能柴油发电机组确保了在 6 000 kW 平稳负荷，两台卸船机同时工作最大负荷突加到 13 000 kW 时，电压和频率等电品质参数满足要求；同时减小了冲击负荷对柴油发电机组轴系频繁的扭矩冲击，减小了轴系的疲劳破坏，延长了轴系使用寿命。



图 2 项目电站实景图

2.1 蓄能机组构成

蓄能机组中每台机组由 MTU4000G63 柴油机、蓄能装置、JFG6302-4 交流发电机、公共底座、单层隔振装置、机旁控制箱、风扇水箱等构成。蓄能机组惯量系统构成：柴油机轴系惯量 23.1 (kg·m²)，发电机转子惯量 125 (kg·m²)，蓄能装置惯量 452 (kg·m²) (蓄能飞轮和弹性联轴器)。蓄能机组如图 3 所示。

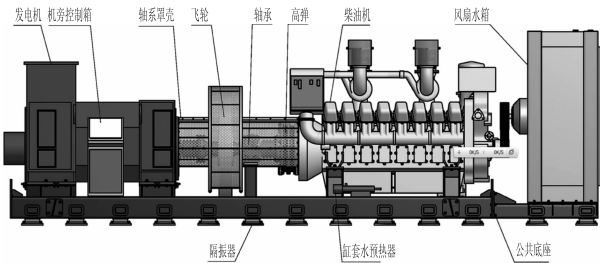


图 3 蓄能机组组成

2.2 蓄能系统设计计算

根据柴油发电机组负荷试验，机组输出功率可简化为图 1 所示，负荷曲线与机组输出功率的差值为蓄能系统释放和吸收的动能。频率曲线反映了负荷突变时频率的变化，两台卸船机同时工作负荷突加时设计频率跌落最低点为 49 Hz，负荷突卸时频率上跳的最高点设计值为 f_h ；两台卸船机负载突加时蓄能系统补充释放的能量为 $2E_d$ ；电网的频率由 50 Hz 下降到 49 Hz 时，每台蓄能机构释放的能量为 E_j ：

$$E_j = \frac{1}{2} J (\Delta \omega^2) \quad 2E_d = 7E_j$$

由以上计算得机组系统惯量： J 。

卸船机负荷突卸时，柴油转速增加，蓄能机构吸收能量，此时的频率为 f_h ，每台蓄能机构释放的能量为 E'_j 。

两台卸船机负载突加时蓄能系统补充释放的能量为： $2E'_d$ 。

$$E_j = \frac{1}{2} J (\Delta \omega'^2) \quad 2E'_d = 7E'_j$$

由上式计算得系统频率： f_h 。

据计算所得的系统惯量设计蓄能装置。该蓄能装置由飞轮、高弹联轴器、中间轴承支撑和中间轴构成，如图 4 所示。

2.3 仿真计算

根据应急柴油发电机组工作特性，利用 AMESim 仿真分析软件建立了 7 × 2 000 kW 应急柴油发电机组仿真模型，如图 5 所示。其中，使用信号库中的 PID 元件搭建柴油机调速器模型；使用机械库中的旋转负荷元件设置系统及飞轮惯量；使用

信号库中的信号源元件输入电站负荷。柴油机转速 $n=1\,500\text{ (r}\cdot\text{min}^{-1})$ ，飞轮及机组惯量为上述计算所得 J 。

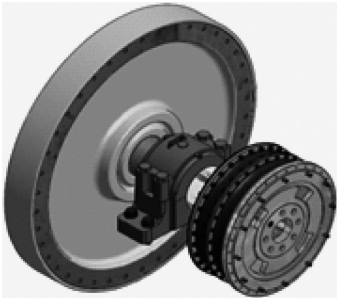


图 4 蓄能装置

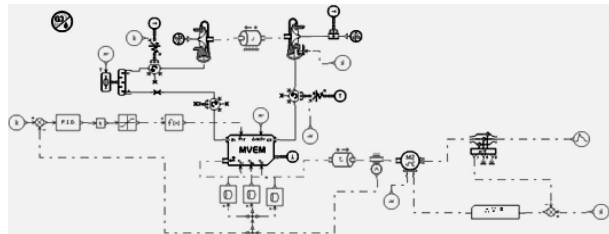


图 5 2 000 kW 蓄能柴油发电机组仿真模型

对带 J 惯量飞轮的柴油发电机组，进行在基础负荷 6 000 kW 上突加 7 000 kW 冲击负荷的工况仿真，频率的变化情况仿真曲线图 6 所示。

由仿真结果可以看出机组能满足频率变化范围在 48.5 ~ 51 Hz 之间的要求。

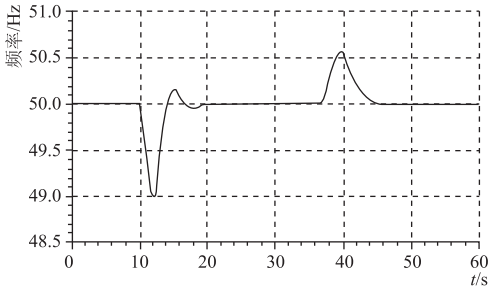


图 6 负荷变化时频率变化曲线

2.4 试验验证

7 台 2 000 kW 蓄能柴油发电机组并联运行，负荷工况及电能质参数如图 7 所示，在基础负荷 6 000 kW 下两台卸船机同时作业，7 000 kW 冲击负荷的工况下，频率波动在 49.5 ~ 50.7 Hz，电压波动 -3.2% ~ 1.6% (6 100 ~ 6 400 V)。

3 蓄能备用电站优点

采用蓄能机组应对港口瞬变负荷，有以下优点：

(1) 机组的装机功率利用率要高

机组装机功率利用系数 α 可由下式表示：

$$\alpha = \frac{\text{电网的最大常用功率}}{\text{总装机功率(扣除备用功率)}} \times 100\%$$

α 值愈大，机组的装机功率利用率愈高，反之，装机利用率低。本项目蓄能电站机组装机功率利用系数可达：

$$\alpha = \frac{13\,000}{14\,000} \times 100\% = 92.9\%$$

(2) 电能质优良

在冲击负荷与平稳负荷比大于 1:1 的工况下，机组装机功率利用系数约达 0.93 的电站配置下，频率波动在 49.5 ~ 50.7 Hz，电压波动 -3.2% ~ 1.6% (6 100 ~ 6 400 V)。

(3) 柴油发电机组轴系冲击小

采用相同的柴油机和发电机配置，一般机组轴系在两台卸船机同时工作时，每台机轴系冲击负荷为

$$\frac{7\,000}{7 \times 3.5} = 285.7\text{ (kW}\cdot\text{s}^{-1})$$

蓄能机组轴系在两台卸船机同时工作时，每台机轴系冲击负荷为

$$\frac{2 \times 2\,900}{7 \times 3.5} = 236.7\text{ (kW}\cdot\text{s}^{-1})$$

很大程度上减小了轴系扭矩冲击，减少了轴系疲劳破坏。

(4) 电站全生命周期经济性好

机组运行状态良好，燃油消耗率低，环境污染小，全生命周期经济性好。

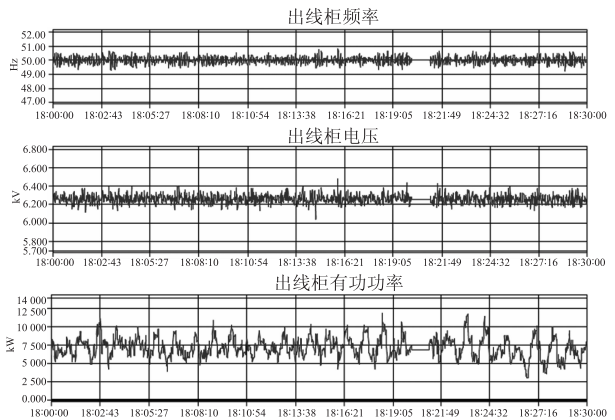


图 7 出线柜运行数据记录

4 结 语

在应急供电状况下，采用蓄能机组建设备用电站可经济高效地满足港口码头这类瞬变冲击用电负荷需求，顺应了绿色低碳的发展趋势。蓄能机组设计和蓄能电站设计技术的进一步提升和推广对经济发展和环境保护有着重要意义。

(下转第 49 页)

表 1 余热利用系统性能计算结果

项目	数值
柴油机排气总流量/(kg·h ⁻¹)	65 020
柴油机排气温度/℃	332
动力涡轮进气温度/℃	482
动力涡轮排气温度/℃	332
动力涡轮进口压力/MPa	0.37
动力涡轮进气流量/(kg·h ⁻¹)	6 699
高压过热蒸汽压力/MPa	0.65
高压过热蒸汽温度/℃	270
高压过热蒸汽流量/(kg·h ⁻¹)	3 395
低压饱和蒸汽压力/ MPa	0.4
低压饱和蒸汽温度/℃	143
低压饱和蒸汽流量/(kg·h ⁻¹)	610
余热锅炉排烟温度/℃	95
余热锅炉余热利用率/%	75.93
汽轮机发电量/ kW	432
动力涡轮发电量 kW	308
有机工质汽轮机发电量 kW	127
总发电量/ kW	897
热效率提高/%	6.03

4 经济性分析^[4]

余热回收系统投资回报时间不应超过五年。以
上述计算结果为依据，对 6S50ME-C8 型柴油机余
热利用系统进行经济性分析。

设：主机工作负荷为 90% = 7153kW；年运行
天数为 280 天；燃油消耗率为 170 (g·(kW·h)⁻¹)；

重油价格为 4500 元/吨。

每年节省的燃油费用为：

$$A = 897 \times \frac{0.17}{1000} \times 280 \times 24 \times 4500 = 4\,611\,297.6 \text{ 元}$$

余热利用系统按 960 万元算，投资年利息按
6% ，投资回收期为：

$$n = \frac{\lg(\frac{461.129\,76}{(461.129\,76 - 960 \times 6\%)})}{\lg(1 + 6\%)} = 3 \text{ 年}$$

5 结 论

回收船舶柴油机余热发电是船舶节能减排的一
项有效措施，经对 6S50ME-C8 型柴油机余热利用
系统的计算和分析，设置柴油机余热利用系统可以
发出 897 kW 的电力，相当于主机功率的 12.5% ，
余热利用系统热效率提高 6.03% 。虽然增加了初
投资，但每年可节省燃油费 461 余万元，3 年内可
收回成本，具有很大的社会效益和经济效益。

参考文献

[1] 李国瑞. 船用柴油机节能减排技术发展思路[J]. 上海
造船,2008(3):15 – 17.
[2] 景国辉,范建新. 船舶柴油机总能利用系统技术发展概
况[J]. 柴油机,2010(6):1 – 4.
[3] 姚寿广. 船舶热力系统分析[M]. 北京:科学出版社,
2003.
[4] 黄志杰. 能源管理[M]. 北京:能源出版社,1984.

(上接第 38 页)

参考文献

[1] 岑海凤. 大容量冲击负荷对邻近发电机组影响的评[J]
中国电力,2010,43(1):10 – 14.
[2] WU Chi-jui, YEN Shih-shong, CHANG Wei-nan, et al.
Enhancement of static extitation system performance for
generators near electric arc furnace loads [J]. IEEE Trans

on Energy Conversion, 1999,14(2):225 – 231.
[3] PENG Ta, TSAI Jong-Ian. Torsional Interactions between an
electric arc furnace load and a turbine-generator set [C]. Pro-
ceedings of 2004 IEEE International Conference on Utility De-
regulation, Restructuring and Power Technologies
(DRPT2004), April, 2004, Hong Kong, China: 627 – 632.