



# 飞轮储能柴油发电机组在集装箱港口中的应用

吕滋锐

(中国交通信息科技集团有限公司, 北京 100032)

**摘要:** 巴基斯坦工业电力供应不足, 大型集装箱港口采用柴油发电机组作为主要的动力能源。然而, 常规中速柴油发电机组承接较大突加负载的能力不足, 发电机组效率较低。针对这一问题, 专门研究和设计了飞轮储能柴油发电机组, 并通过性能测试。结果表明, 飞轮储能柴油发电机组自身能够承接较大的突加负载, 在与常规发电机组并网运行时, 能够提高常规柴油发电机组的工作效率, 并且能够承担较多的突加负载, 并非理论上的完全按比例分配。

**关键词:** 集装箱港口; 柴油发电机组; 飞轮储能

中图分类号: U 653.95

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0080-05

## Application of diesel genset with flywheel energy storage at container port

LYU Zi-rui

(China Communications Information Technology Group Co., Ltd., Beijing 100032, China)

**Abstract:** In Pakistan, the industrial power supply is insufficient, and large container ports use diesel gensets as their main power source. However, the conventional medium-speed diesel gensets fail to withstand a large suddenly applied load and have low efficiency. To solve this problem, this paper designs diesel gensets with flywheel energy storage, and completes the performance tests. The results show that the proposed diesel gensets can withstand a large suddenly applied load by itself. During its grid-connected operation with a conventional genset, the proposed diesel genset can also improve the work efficiency of the conventional diesel genset. Moreover, the conventional diesel genset can bear a more significant portion of the suddenly applied load, which is not exactly proportional allocation as in the theoretical analysis.

**Keywords:** container port; diesel genset; flywheel energy storage

巴基斯坦某集装箱港口, 一期建设自用孤岛电厂, 电厂内安装有 3 台 MAN 品牌的中速柴油发电机组(简称 MAN 发电机组), 单机组容量 8.5 MW, 2 台康明斯品牌高速柴油发电机组(简称 LL 发电机组), 单机组容量 2 MW, 以及相关的辅助系统。所有机组可以独立运行, 也可以并网运行。在运营过程中发现, 虽然 MAN 发电机组容量较大, 但在承接岸桥起重机的突加、突卸负载能力方面表现不足, 岸桥起重机功率波动频繁引起 MAN 发电机组排烟超温而报警, 严重时停机, 这对港口生产和安全带来巨大隐患。为保障发电

机组能够稳定运行, 通过增加在网机组总容量的方式提高电网系统的抗冲击能力, 此举导致柴油机负载率只达到发电机额定容量的 50% 左右, 平均运行负载率低于 30%。为了解决岸桥起重机的功率波动对 MAN 发电机组的影响, 二期工程将采用 8MW 自带储能系统的柴油发电机组。

### 1 储能技术的种类

#### 1.1 化学储能

储能技术是指通过化学、电磁等方法实现对能量的储存, 并在需要时将能量释放为用电设备

提供电能的技术。它是解决电网间歇性和不稳定性、保障电网安全的一种能源技术。

化学储能主要是指电池储能，包括<sup>[1]</sup>：1) 铅酸电池。具有寿命长、价格低、可以大电流放电等优点，但是过于笨重，同时铅对环境污染较为严重。2) 锂电池。具有能量密度高、充放电速度快、质量轻、寿命长、无环境污染等优点，但锂离子电池主要的问题是在过充电和过放电状态下会发生爆炸。3) 钠硫电池。具有能量密度高、充放电效率高、运行成本低、占地面积小、维护方便等优点。但放电深度和循环寿命有待提高，运行需要保持 300 ℃ 的高温环境。

1.2 电磁储能

电磁储能是功率型储能技术，主要包括<sup>[2]</sup>：1) 超级电容器。具有循环效率高、充放电速度快、功率密度高、循环充放电次数多、工作温度范围广等优点，其制约因素主要是能量密度低、自放电率较高、成本较高。2) 超导磁储能。是将通过变流器进入线圈的电能转换为磁能进行储存的一种储能技术，在进行转换电能时，功率输送无需进行能源的形式转换，其响应的速度为毫秒级，转换与循环的效率较高，具有较大的功率密度和比容量。

1.3 机械储能

机械储能主要包括：1) 抽水储能。技术上成熟可靠，容量可以做到很大，但是受水库库容限制。2) 飞轮储能。技术比较成熟，具有可长期循环使用、寿命长、几乎不受充放电次数限制、安装维护方便、对环境无危害的优点。3) 压缩空气储能。具有储能容量大、存储时间长、建设周期较短、寿命长且无污染等优点，可用于削峰填谷、平抑可再生能源间歇性和参与电网二次调频等<sup>[3]</sup>。

根据各种储能技术的特点，抽水储能、压缩空气储能和化学电池储能适用于系统调峰、大型应急电源、可再生能源接入等大规模、大容量的应用场合，而超导磁、飞轮及超级电容器储能适用于需要提供短时较大脉冲功率的场合，如应对

电压暂降和瞬时停电、提高用户的用电质量、抑制电力系统低频振荡、提高系统稳定性等。

2 储能方式选择

从各类储能应用的场合以及本工程对突加/突卸负载的技术要求上进行选择，只有超导磁、飞轮及超级电容器储能满足要求。在这 3 种储能方式中，飞轮储能无论是在安全性、维护性还是经济性都优于其他两种储能方式，经过有效的计算和论证，并针对本工程技术要求以及孤岛变电站的特殊环境，最终采用中国船舶集团有限公司 711 研究所的飞轮储能柴油发电机组，并为本工程发电机组进行单独设计和研究。

飞轮储能柴油发电机组是在常规的高速柴油发电机组的基础上增加储能飞轮，以柴油机作为原动机，在柴油机和发电机之间增加储能飞轮结构，仅长度和质量比常规柴油发电机有所增加，但机组对于大容量突加负载的承受能力得到极大提升<sup>[4]</sup>。飞轮储能发电机组曾在中国马迹山港作为应急柴油发电机组被成功应用。

3 飞轮储能柴油发电机组总体设计方案

3.1 飞轮设计

为了满足岸桥起重机在不同组合方式下的负载需求，二期工程将采用 4 台单机容量 2MW 的飞轮储能柴油发电机组，柴油机采用德国 MTU 柴油机，设计总容量 8 MW。能够满足多达 3 台岸桥起重机同时工作的条件要求。同时，可以与任何 MAN 发电机组和 LL 发电机组并网运行，以满足最多 16 个岸桥起重机以及其他基础设施的电力需求。

飞轮是飞轮储能柴油发电机中的核心部件，由于是扩建项目并且需要解决负载的突加/突卸对 MAN 发电机组的冲击问题，所以根据实际需求，需要对飞轮进行设计，经过飞轮轴系转动惯量计算和有限元分析，最终确定了飞轮的材料密度、质量、外径、平均直径。飞轮 3D 设计效果如图 1 所示。

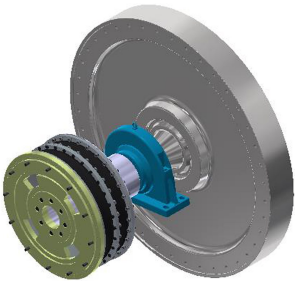


图 1 飞轮 3D 设计效果

3.2 飞轮轴设计

飞轮轴是储能系统的主要部件，位于柴油机和发电机之间，通过在该轴系上设置合适惯量的飞轮<sup>[5]</sup>，吸收和释放能量补充突加负载时对柴油机功率的冲击。飞轮轴系主要由飞轮、飞轮轴、联轴器、飞轮轴轴承、电机法兰组成。根据轴系上零件的布置，结合轴上零件的安装及固定，综合考虑飞轮轴的结构设计，飞轮轴结构 3D 效果如图 2 所示。

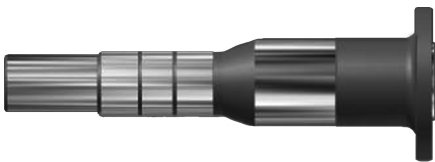


图 2 飞轮轴结构 3D 效果

经过飞轮以及轴承的设计与计算，储能飞轮、飞轮轴三维模型进行适当简化，去除对应力分析结果影响不大的结构，保证计算量的经济性和计算结果的正确性，简化模型及轴系布置如图 3 所示。

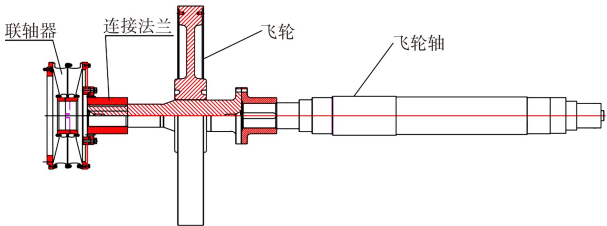


图 3 简化模型及轴系布置

3.3 飞轮储能柴油发电机组整体设计效果

经过对发电机组公共底座、飞轮、轴承的设计以及对柴油发电机、法兰以及发电机的选择，将所有部件进行模拟组装，飞轮储能柴油发电机组的整体 3D 设计效果见图 4。

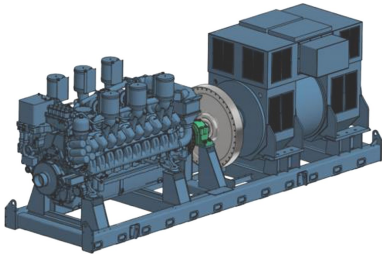


图 4 飞轮储能柴油发电机组 3D 设计效果

4 测试效果

4.1 单机测试

整个测试分 3 步进行组织实施：第 1 步进行设备单体测试，主要包括 4 台飞轮储能柴油发电机组的单机测试；第 2 步分别进行 4 台新机组与一期发电机组的并网测试；第 3 步进行抗冲击性能测试。

单机测试包括单机空载测试和单机负载测试，其目的是检验新发电机组安装后各辅助系统是否完善，发电机组单机运行是否正常以及在单独加负载的情况下各项系统参数是否正常。经测试，通过外加移动式负载箱，新增 4 台发电机组在 25%、50%、75%、100%、110% 额定负载下各项功能和参数均正常。

4.2 并网测试

二期的 4 台飞轮储能柴油发电机组完成单体测试后，与一期 3 台 MAN 发电机组以及 2 台 LL 发电机组分别进行并网测试，为了满足每一台发电机组均能够参与到测试中，确定的并网运行组合方式见表 1。

表 1 并网运行组合方式

组合方式	基础负载/kW	组数
任意 1 台 MTU 机组+任意 2 台 LL 机组	2 000	2
剩余 2 台 MTU 机组+任意 1 台 LL 机组	2 000	1
任意 1 台 MTU 机组+任意 1 台 MAN 机组	2 000	2
剩余 2 台 MTU 机组+任意 1 台 MAN 机组	2 000~2 300	1
任意 1 台 MTU 机组+任意 1 台 MAN 机组+任意 1 台 LL 机组	2 000~2 300	1
4 台 MTU 机组	5 400	1

注：MTU 机组为飞轮储能柴油发电机组。

经上述方式的组合运行，每种组合并网运行 2 h，新增机组与一期机组一次并网成功。

4.3 抗冲击性能测试

为了检验飞轮储能柴油发电机组在岸桥起重机的功率波动下的稳定性、抗冲击能力以及检测设计上的突加/突卸效果能否达到要求，并检测飞轮储能柴油发电机组与一期 MAN 发电机组进行并网运行时，能否降低负载对 MAN 发电机机组的冲击影响并

彻底解决一期发电机组抗冲击问题，测试结果为：

1)4 台飞轮储能柴油发电机组抗冲击性能测试。设计负载要求：基础负载 1.800 MW(实际负载)，3.600 MW 突加/突卸负载。性能曲线见图 5。可以看出，现场实际负载为 2.513 MW，峰值负载为 6.627 MW，突加时间 10 s，则突加负载为 4.114 MW，满足设计要求。并且在此过程中，发电机组运行正常，无任何报警信息。

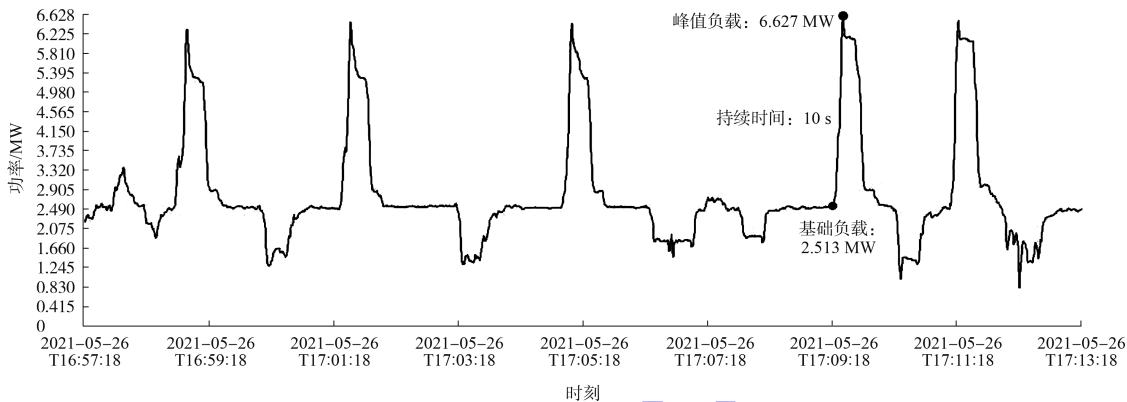


图 5 4 台飞轮储能柴油发电机组性能曲线

2)4 台飞轮储能柴油发电机组抗冲击性能测试(现场临时追加测试)。为了检验飞轮储能柴油发电机组的最大抗冲击能力，经过理论分析后，将基础负载提升至 3.600 MW，同时进行 3.600 MW 的突加

负载测试，测试结果曲线如见图 6。可以看出，现场实际负载为 3.762 MW，峰值负载为 7.381 MW，突加时间 9 s，则突加负载为 3.619 MW，发电机组运行正常，无任何报警信息。

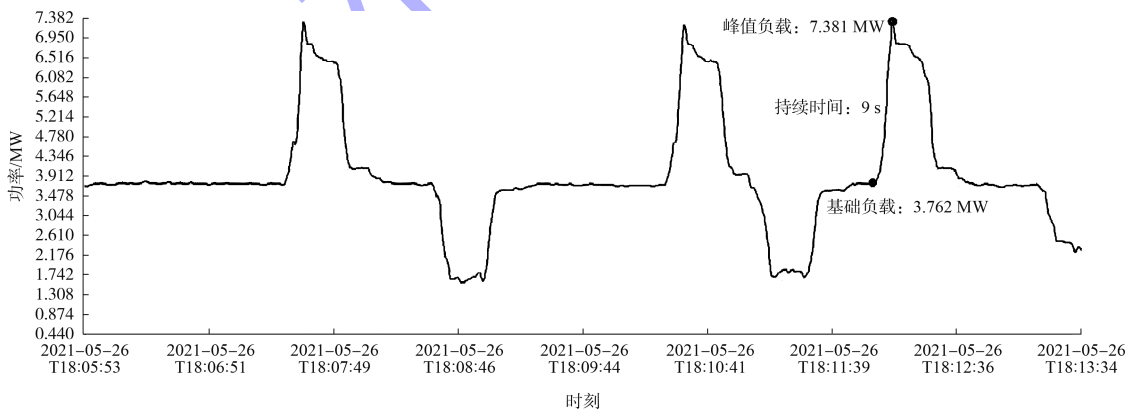


图 6 追加测试的 4 台飞轮储能柴油发电机组性能曲线

3)飞轮储能柴油发电机组与 MAN 发电机组并机测试。为了检验飞轮储能柴油发电机组储能效果以及能否解决一期 MAN 发电机组的抗冲击能力问题，经过理论计算分析后，将测试组合更改为1 台MAN 机组+1 台飞轮储能柴油发电机组，测试负载要求为基础负载 3.600 MW，同时进行

3.600 MW 的突加负载测试，测试结果曲线见图 7。可以看出，MAN 发电机组现场实际负载为 4.145 MW，峰值负载为 7.119 MW，突加时间 10 s，则突加负载为 2.974 MW，MAN 机总功率为 8.000 MW，如今增加飞轮储能柴油发电机组后，MAN 发电机所能承受的最大负载为 7.119 MW，



将近总功率的 89%。由此可见，增加了飞轮储能柴油发电机组后，通过并机运行，负载能力由原来的不足 59% 提高到 89%，大幅提高了负载能力。

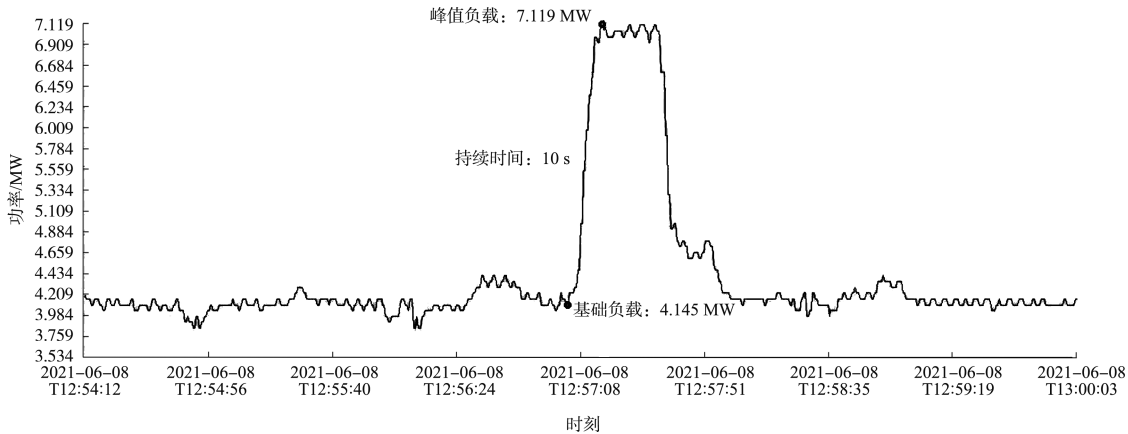


图 7 MAN 发电机组性能曲线

飞轮储能柴油发电机组在本工程的应用解决了用户现场实际问题，测试效果超出预期，由此可以证明飞轮储能柴油发电机组在集装箱码头中，以及孤岛变电站中的应用是成功的，具有较高的可推广价值。

5 结语

- 1) 飞轮储能发电机组采用一体化设计，如无特殊要求，可用于量产。
- 2) 飞轮储能柴油发电机组在负载 110% 测试上，机组运行平稳，能够提供可靠动力能源。
- 3) 在突加/突卸抗冲击能力测试过程中，飞轮储能柴油发电机组本身抗冲击能力达到了设计最初要求，与一期 MAN 发电机实行并网运行，在负载分配上能够承担较多的冲击负载，并非完全按

比例分配。  
4) 巴基斯坦市电供应不足且不稳定，针对于港口作业，飞轮储能柴油发电机组的成功应用无疑为其本身增加了在该地区的市场竞争优势。

参考文献：

[1] 丁明,陈忠,苏建徽,等.可再生能源发电中的电池储能系统综述[J].电力系统自动化,2013,37(1):19-25,102.  
[2] 董舟,王宁,李凯,等.储能技术分类及市场需求分析[J].中国金属通报,2019(11):181-182.  
[3] 张新敬,陈海生,刘金超,等.压缩空气储能技术研究进展[J].储能科学与技术,2012,1(1):26-40.  
[4] 庞宇.船舶多模式电站运行及电网电能质量的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.  
[5] 罗祥程.机械飞轮动能回收系统设计[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.

(本文编辑 王璁)

(上接第 73 页)

参考文献：

[1] 中交水运规划设计院有限公司.黄骅港煤炭港区四期工程工可研报告[R].北京:中交水运规划设计院有限公司,2012.  
[2] 中交水运规划设计院有限公司.黄骅港煤炭港区 5 万吨级航道工程工可研报告[R].北京:中交水运规划设计院有限公司,2013.  
[3] 中交水运规划设计院有限公司,中交第一航务工程勘察设计院有限公司.海港总体设计规范:JTS 165—2013[S].北京:人民交通出版社,2013.

[4] 中交水运规划设计院有限公司.黄骅港煤炭港区 7 万吨级航道一期工程工可研报告[R].北京:中交水运规划设计院有限公司,2021.  
[5] 禹化强,唐颖.基于仿真技术的黄骅港煤炭港区航道拓宽方案确定[J].水运工程,2021(10):316-322,327.  
[6] 彭骏骏.煤炭码头堆场垛位分配优化模型研究[J].港口装卸,2019(4):36-40.  
[7] 中交水运规划设计院有限公司.黄骅港 2 亿 t 能力关键技术保障研究[R].北京:中交水运规划设计院有限公司,2019.

(本文编辑 王璁)