



# 自发电集装箱码头微电网改造方案配置思路

杨玉琢, 韩松, 陶平, 罗峰, 李孟晖  
(中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

**摘要:** 集装箱码头在不发达国家、地区, 在供电基础设施条件不满足运营需要的情况下, 多采用自建柴油机电站供电的形式。岸桥起重机在作业过程中负荷特性频繁波动, 在极端情况下会有很大的逆功率反馈到供电系统中, 给柴油机组运行带来挑战。根据所依托工程的情况, 对比研究不同储能技术特点, 提出以解决负荷侧波动对供电系统的影响为重点考虑、采用高速电气飞轮和 BESS 两组储能装置研究的建议, 并且给出开展微网控制策略研究、预留新能源接口及微网协同、微配协同接口的研究思路建议, 形成模块化、标准化、智能化的集装箱码头微电网配置方案。

**关键词:** 集装箱码头; 微电网; 自发电; 储能系统

中图分类号: U653

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0089-06

## Configuration idea of microgrid retrofit scheme for self power sufficient container terminal

YANG Yuzhuo, HAN Song, TAO Ping, LUO Zheng, LI Menghui  
(China Harbour Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

**Abstract:** Container terminal located in developing country or region, where power grid cannot fulfill the terminal power consumption, usually rely on a diesel-based power generation. The ship to shore crane operation character is a frequent fluctuated load. In some extreme condition, the operation of diesel gen-set faces a challenge because of a large inverse power feedback to the power supply system. According to the condition of the project supported, we compare different energy storage technologies, propose a recommendation that using high-speed fly wheel system and battery energy storage system (BESS) to develop a micro-grid improvement retrofit scheme to mitigate the fluctuations from the load side. We also propose suggestions on micro-grid control strategy study, interfaces for renewable power connections and interfaces between other micro-grid and distribution grid, so as to develop a modular, standardized and intelligent micro-grid configuration scheme for container terminals.

**Keywords:** container terminal; micro-grid; self power sufficient; energy storage system

集装箱码头工程建设在不发达国家和地区存在无市电接入或市电不稳定的情况。此类情况需要依靠自建电站供电满足港口码头长时间作业的需求。近年来中国港湾公司在厄瓜多尔多用途码头、东帝汶帝巴集装箱码头、尼日利亚莱基港、喀麦隆克里比工程均出现了类似的情况和需求, 上海振华公司也在哥伦比亚卡塔赫纳港遇到了此类情况<sup>[1]</sup>。

集装箱码头一般会配有岸桥起重机作为装卸集装箱的主要设备。岸桥有启升、俯仰、小车及

大车等机构, 常规机型一般可以实现启升和小车的联动操作。岸桥起重机在启升机构下降、小车机构减速时所产生的回馈能量最大。这部分机械能通常经过再生制动、能量回馈方式返回电网。但在码头自发电情况下, 常规柴油发电机组不具备长时间吸收较大回馈逆功率的功能。

对于柴油机发电-用电系统而言, 当出现用电负荷反向馈能时, 首先由发电机进行吸收, 其响应速度较快, 但由于发电机的机械惯量及调节能

力有限,只能承受发电机额定功率的 10%,且时间不得超过 3 s。逆功率会造成电压、频率波动,机组保护动作影响整个码头供电稳定。

单台岸桥最大回馈功率接近 1 800 kW,单次逆功回馈时间最长可达 30 s。通常采用在直流侧加制动单元和电阻或在交流侧安装逆功率吸收电阻的方式将电能以发热方式释放出去。

本文改造方案研究依托莱基港工程开展,对微网配置、改造接入的接口技术进行研究,并提出一种智能潮流控制方案。控制储能装置的充放和能量吸收装置的投切,实现稳定电网电压、频率,减少负荷变化对发电机组的冲击,减少柴油机污染排放、延长设备使用寿命,提升经济效益。

## 1 国内外微电网研究及应用情况

世界各国在微电网领域的规划和布局各有侧

重。总体上看,在抢占技术研发优势的同时,都十分注重技术成果的后续应用和示范。

美国提出“Grid 2030”发展战略,将微网技术作为智能电网的关键构成;欧盟为进一步满足电力市场、电能安全供给及环保等领域的需求,在“Smart Grid”计划中,强调要充分利用微电网技术的智能性、能量利用多元化等特点,使其成为欧洲未来电网的重要组成部分;新加坡理工大学与 SP 集团合作开发首个试验性城市微电网项目,新加坡国立大学和 KEPPEL 公司合作开展智能 AC/DC(交流/直流)微网研究。

部分国内外微网储能实践案例见表 1<sup>[2]</sup>。在统计案例中,未见与港口装卸起重作业工况类似的案例。陆青等<sup>[3]</sup>对光储电站在集装箱码头开展了方案研究,配合应急柴油发电机使用,适合断电频繁但每次时间小于 2 h 的情况。

表 1 部分国内外微网储能实践案例

工程位置	微网形式 (拓扑结构)	电源类型	备用电源、储能	负载类型	控制方式
CERTS, US	网状, 交流, 试验台	天然气	电池	静态负载	分散, 恒功率(PQ)控制
Santa Rita Jail, US	交流, 实际应用	光伏, 燃料电池, 风电机组	电池, 柴油发电机	商业负载	-
Hartley Bay, US	交流, 实际应用	柴油发电机	-	住宅负载, 商业负载	智能计量和监控
Boston Bar, Canada	辐射, 交流, 实际应用	水轮机	柴油发电机	住宅负载	分散 PQ 控制
CESI RICERCA, Italy	辐射, 直流, 试验台	光伏, 风电机组, 热电联产, 柴油发电机	飞轮储能, 电池	静态负载	集中, 本地下垂(droop)控制
UW-Madison, US	辐射, 交流, 试验台	光伏, 柴油发电机	电池	静态负载	分散, 功率-频率下垂(P-f droop)和电压控制
Hawaii, US	辐射, 直流, 试验台	光伏, 风, 燃料	电池	住宅负载, 静态负载	集中
Bronsbergen, Netherland	网状, 交流	光伏	电池	住宅负载	集中
Palmade Microgrid, California	辐射, 交流, 实际应用	风电机组, 水轮机	柴油发电机, 气	住宅负载, 商业负载, 静态负载, 电机	分散
Stutensee, Germany	网状, 交流	光伏, 热电联产	电池	住宅负载	代理控制器
UT Arlington Testbed, Texas	辐射, 直流, 试验台	光伏, 风电机组, 燃料电池	柴油发电机, 气, 电池	住宅负载, 静态负载	分散
DeMoTec, Kassel, Germany	网状, 交流, 试验台	风电机组, 电池, 柴油发电机	电池, 柴油发电机	住宅负载, 商业负载	代理控制器
RIT Microgrid, New York	网状, 交流, 试验台	光伏, 风电机组, 燃料电池	-	住宅负载, 静态负载, 电机	分散
NTUA, Greece	辐射, 交流, 试验台	光伏, 风电机组	电池	商业负载	本地 PQ 控制, 多代理(智能体)系统
Kythnos, Greece	辐射, 交流	光伏	电池, 柴油发电机	住宅负载	集中
FIU Testbed, Florida	辐射, 直流, 试验台	光伏, 风电机组, 燃料电池	飞轮储能	住宅负载, 电机	集中, 智能体控制器
Manchester, UK	辐射, 交流, 试验台	同步发电机	飞轮储能	商业负载	代理控制器

续表1

工程位置	微网形式 (拓扑结构)	电源类型	备用电源、储能	负载类型	控制方式
University of Nottingham, UK	辐射, 直流, 试验台	风电机组	电池	住宅负载	分散
New York University, US	交流, 实际应用	热电联产, 天然气, 蒸汽透平	-	商业负载	-
Sendai, Japan	辐射 交流, 实际应用	光伏, 燃料电池, 气	电池	住宅负载, 商业负载, 工业负载	集中 PQ 控制
Kyoto, Japan	网状, 交流, 实际应用	光伏, 燃料电池, 风电机组	电池	住宅负载	集中
Hachinohe, Japan	辐射, 交流, 实际应用	光伏, 风电机组, 沼气, 热电联产	电池	商业负载, 工业负载	集中
Aichi, Japan	辐射, 交流, 实际应用	光伏, 燃料电池	电池	工业负载, 住宅负载	集中
Shimizu, Japan	-	气	电池, 电容	商业负载	-
KERI, Korea	辐射, 交流	光伏, 光伏-风电机组	电池, 柴油发电机	-	-
NSBET, Ireland	辐射 交流, 试验台	风电机组, 热电联产, 燃料电池	电池	住宅负载	集中
CAT, Wales, UK	-	水轮机, 风电机组, 光伏, 沼气	电池	-	集中
Ramea, Canada	网状, 交流, 实际应用	风电机组, 柴油发电机	电池	住宅负载	分散
Quebec, Canada	辐射, 交流, 实际应用	蒸汽透平	-	住宅负载	分散
Fortis-Alberta, Alberta, Canada	辐射, 交流, 实际应用和试验台	风电机组, 水轮机	-	工业负载	集中
Mad River Park, Vermont, US	网状, 交流, 试验台	光伏, 柴油发电机	电池	住宅负载, 商业负载, 工业负载	分散
UT Austin, Texas	辐射, 交流, 试验台	柴油发电机, 气, 电机	飞轮储能	静态负载, 电机	分散
Albuquerque, New Mexico	辐射, 交流, 实际应用	光伏, 燃料电池, 热电联产, 气	电容	住宅负载, 商业负载, 电机	分散
Girona, Spain	网状, 交流	光伏, 风电机组	柴油发电机, 电池	商业负载, 住宅负载	集中
Bornholm, Denmark	-	柴油发电机, 蒸汽透平, 风电机组, 沼气	-	静态负载	分散 PQ 控制
EDP, Portugal	辐射, 交流, 实际应用和试验台	热电联产, 柴油发电机	-	商业负载	-
Samso Island, Denmark	-	风电机组, 沼气, 光伏, 地热	-	住宅负载, 商业负载	-
Continuon, Netherland	-	光伏	电池	住宅负载, 商业负载	集中
Labein, Spain	-	光伏, 风电机组, 柴油发电机	飞轮储能, 电池, 超级电容	商业负载	集中 PQ 控制
HFUT, China	网状, 交流, 试验台	光伏, 风电机组, 水轮机, 燃料电池, 柴油发电机	电池, 超级电容	静态负载	本地 PQ 控制, 代理控制器
Labscale China	-	光伏, 风电机组	电池	静态负载	集中 PQ 控制
F. Y. R. O. M Kozuf	交流, 实际应用	沼气	-	商业负载	分散
Mannheim, Germany	-	光伏, 热电联产	电池	住宅负载	-

我国微电网研发与建设均起步较晚, 但在政府的积极推进下, 取得了重要的进展和积极成效。在技术研发方面, 储能技术方向, 无论从电池还是飞轮储能装置技术能力不断提高。同时, 一批

高校和科研院所在微电网控制、运行及对主网安全稳定运行的影响等方面开展了研究, 并取得了积极进展, 如中国电科院的连续孤网运行和并网/孤网无缝切换研究<sup>[4]</sup>等。

最近几年国内企业级电网智能控制也有了突破性应用进展。中冶京诚在钢铁行业领域开展电网潮流自动化控制技术研究,研发出电网潮流控制系统<sup>[5]</sup>。该系统可以实现:自动拓扑识别,负荷切除及负荷分级,快速减载要求,机组侧实时一、二次调频,全网电压及频率的稳定控制。潮流控制系统可以完整地控制全厂电网的各个电源和负荷,根据它们之间的关系发出协调控制指令,维持电网的长期稳定运行。系统具备数据采集、自动潮流控制、负荷管理和相关的数据记录以及人机交互等功能。

借鉴智能电网技术在钢铁行业应用案例针对港口集装箱码头供电系统用电特点及需求,研究出微网智能潮流控制方案是可行的,并能够提高电网稳定性、实现显著的节能经济效果。

## 2 港口储能装置研究及应用

电化学储能是目前应用最广泛的一种储能方式,其中最主要的是电池储能,其优点是能量密度高、能量输出稳定,储能方式对比见表 2<sup>[6]</sup>。

连云港 35 kV 庙岭变岸电配套 5 MW 储能电站项目是国网江苏近年来积极推进港口岸电建设发展过程中首个岸电储能工程。其中包含 4 MW/4 MWh 锂离子电池储能系统和 1 MW·15 s 超级电容储能系统,该工程满足总量 10 MW 以上以及单个泊位 3 MW 以上岸电接入需求,在岸电满负荷运行的情况下,留有足够的余量,满足多种随机性电源和负荷的接入需求。工程采用长寿命方舱式混合储能电站,实现削峰填谷的效果。

表 2 储能方式技术对比

储能方式	效率/%	比能量/(W·h·kg <sup>-1</sup> )	比功率/(W·kg <sup>-1</sup> )	功率费用/(美元·kW <sup>-1</sup> )	循环寿命
抽水蓄能	75	-	低	600~2 000	很长
化学电池	85	10~200	低	300~2 500	中
超导磁能	90	-	高	300	长
飞轮储能	90	5~100	高	350	长
超级电容	90	5~30	高	300	长

朱兴业等<sup>[7]</sup>针对岸桥起重机,开展了超级电容储能仿真研究。巴基斯坦卡拉奇深水港工程中

应用了飞轮储能柴油发电机组<sup>[8]</sup>。其中低速机械飞轮方案核心思路是通过在柴油发电机组结构中设置大惯量飞轮,使其在突加负荷时释放能量,在低负荷时储存能量,以维持孤岛电站发电机组在频繁载荷波动下的运行状态,保证频率电压在要求范围内平稳运行,确保高品质电源输出。方案缺点为:飞轮储能柴油机组为定制产品,飞轮大小受机组功率大小有选型限制,不方便扩展;对于已建成工程,机组改造难度大。

美国长滩港<sup>[9]</sup>和深圳盐田港均有使用飞轮储能技术在轮胎吊上的单机应用案例,其中长滩港的应用见图 1。在仍保有制动电阻的前提下增加了飞轮储能装置,飞轮储能装置在落箱作业和小车制动时储能,在提箱作业时释放能量,达到减少了燃油使用和有害气体排放的效果,节约能源消耗 30%。



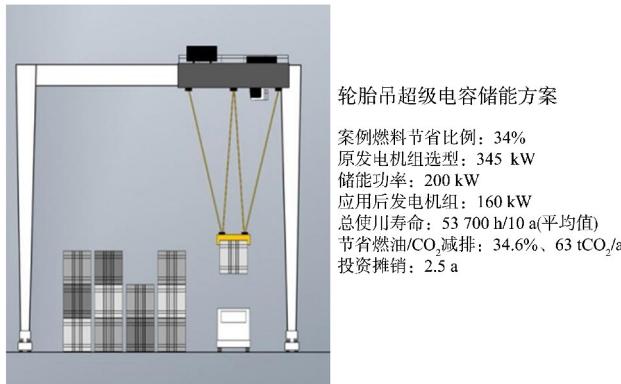
图 1 RTG 飞轮储能的单机应用

江阴港 40 t 门机再生制动储能实载试验方案中设备配置应用了飞轮储能系统<sup>[10]</sup>。在选型过程中发现,与电池和超级电容相比,飞轮储能特别适合工作温度范围大、需要大功率频繁充放的应用场景,且具有储能效率高、设备寿命长、制造材料环保等优点。

上海洋山港二期和三期、东京大井码头有超级电容储能技术在轮胎吊上的单机应用案例<sup>[11]</sup>,可减小柴油发动机选型从而低油耗,综合节能率达 35% 以上,降低发电机容量约 40%<sup>[12]</sup>。该系统

在高作业量和高负荷作业环境下, 节能效果会更明显。

Liebherr 公司推出了轮胎吊单机超级电容方案见图 2, 但功率较小, 寿命较飞轮储能短, 不如集



中布置的经济性好。

2023 年沙特 Oxagon 港集装箱码头堆场工程招标, 供电系统设计采用了光伏和电池 BESS 储能系统集中布置方案, 储能初步设计规模为 30 MW/40 MW·h。



图 2 RTG 超级电容单机应用

### 3 依托工程的供电系统

尼日利亚莱基港工程集装箱码头使用柴油发电机供电, 共 8 台发电机, 目前工作模式为 5 台在用、3 台备用, 单台发电机功率为 2 080 kW。工程一期竣工后柴油电站给整个堆场包含 5 台岸桥起重机供电, 岸桥属于短时周期性重复负荷设备, 一个作业负荷周期时间在 80~90 s, 在提升集装箱作业时会突然增加负荷, 瞬时功率将达到 1 900 kW, 但结束起升作业后瞬时功率将迅速下降, 功率将降低到 100 kW 以下, 如果是落箱作业和小车制动作业时将产生逆功率反馈给电网, 最大反馈功率可达 1 800 kW, 单次最长反馈时间可达 30 s, 柴油发电机不具备吸收再生电能的能力; 莱基港工程是通过在岸桥上加装制动电阻, 然后将电能通过散热的方式消耗掉, 从而解决逆功问题。

这种解决方案存在以下问题: 1) 加装制动电阻产生的设备费用较高, 且需要改变电气室布置、安装还有高空作业和动火风险; 2) 产生的逆功率通过发热方式消耗, 浪费能源; 3) 因为岸桥为周期短时突加负荷作业情况, 而发电机的启动到稳定阶段至少需要 3 min, 现场曾发生发电机启动数量不足而多台岸桥作业负荷突然升高导致发电机

发电容量不够, 而发生发电机停车的现象。为了保证输出功率能够满足负载变化率和供电电能质量的要求, 作业时只能开启匹配岸桥数量的发电机, 但由于岸桥作业时负荷波动特性, 发电机的平均工作负载过低, 超出了经济油耗区间。日常平均功率仅为 250~300 kW, 既浪费能源又不利于发电机的寿命。

### 4 微网储能方案设备比较研究及选择

起重作业时驱动电机功率对微网中储能装置充放电速率要求相对较高。经过对比不同类型储能装置技术性能初步筛选出飞轮、电池储能系统(BESS)、超级电容, 进一步研究确认最适合的方案。

借鉴江阴港门机试验选型对比分析过程及试验结论, 飞轮与超级电容相比在放电深度、大功率稳定性(多级串并联一致性)、工作温度范围、容量衰减等方面具有优势。

综合考虑依托工程情况后, 建议采用两组储能设备, 高速电气飞轮和 BESS 对比更具有研究价值。合理配置储能功率和容量, 重点满足系统一、二次调频需求, 兼顾应急、长时储能需求。研究成果可有效指导项目投标和实施。

## 5 方案配置研究的主要内容

按照微网+飞轮储能+BESS 系统配置思路, 可开展方案研究内容为: 1) 电网拓扑自动识别技术方案。研究自动识别电网拓扑技术方案, 如电网运行模式、开关状态、主要设备投用情况。2) 电网潮流监测位置、监测方式。研究信号采集装置的安装位置及形式, 信号传输形式及监测装置的通讯协议等。3) 电网潮流控制策略。根据拓扑识别状态、电网运行模式、主要设备投用情况、储能装置充放电状态、逆功率吸收装置状态, 智能判断潮流控制需求, 研究智能分配各装置潮流控制的技术方案。4) 岸桥起重机供电电源选择切换方案。岸桥根据港口码头电站的运行模式对单机设备制动单元、电阻工作模式的切换方案研究、多台岸桥工况优化研究。5) 飞轮储能装置充放电深度及储能变流器(PCS)充放电功率控制。研究飞轮转速对应充放电状态, 不同转速对应充放电功率的情况, 合理确定充放电功率和周期, 控制接口研究。6) BESS 电池配置、充放深度、PCS 控制及接口研究。7) 逆功率吸收装置(RPAS)控制。研究 RPAS 装置快速投切响应技术方案、RPAS 潮流控制接口。

## 6 结语

1) 此次微电网改造方案配置研究, 根据依托工程情况, 主要以解决负荷侧波动为重点考虑。建议采用两组储能设备, 高速电气飞轮和 BESS 对比更具有研究价值。

2) 拟开展微网控制和逆功储放配置及策略相关的研究, 可考虑预留光伏、风能等新能源接口。

3) 可借鉴配电网控制需求, 充分考虑到微网

集群协同、微配协同功能要求。预留接口, 形成模块化、标准化、智能化的港口微电网配置方案。

## 参考文献:

- [1] 傅世辉, 崔晔. 起重机可选供电电源的若干问题探讨[J]. 起重运输机械, 2018(7): 144-145, 152.
- [2] CHANDAK S, ROUT P K. The implementation framework of a microgrid: a review [J]. International journal of energy research, 2021, 45(3): 3523-3547.
- [3] 陆青, 周崎. 光储电站在集装箱码头的应用研究[J]. 起重运输机械, 2018(10): 146-151.
- [4] 国网系统首个 100 千瓦级风光储微电网实验平台正式投入运行[J]. 电气技术, 2011(12): 92-92.
- [5] 李宏伟. 基于 CPS 的钢铁企业电网智能管控[J]. 冶金能源, 2023, 42(3): 53-57.
- [6] 戴兴建, 魏鲲鹏, 张小章, 等. 飞轮储能技术研究五十年评述[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(5): 765-782.
- [7] 朱兴业, 李星. 再生能源回收技术在岸边集装箱起重机中的应用[J]. 起重运输机械, 2016(2): 70-72.
- [8] 吕滋锐. 飞轮储能柴油发电机组在集装箱港口中的应用[J]. 水运工程, 2022(8): 80-84.
- [9] FLYNN M M, MCMULLEN P, SOLIS O. High-speed flywheel and motor drive operation for energy recovery in a mobile gantry crane [C]//IEEE. Proceedings of Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. New York: IEEE, 2007: 1151-1157.
- [10] 王勤. 飞轮储能在港口吊机制动能量再生系统中的应用[J]. 现代交通技术, 2014, 11(3): 77-79.
- [11] 金毅.“超级电容系统”轮胎吊(HYBRID RTG)在洋山深水港区三期工程的运用[J]. 港口科技, 2013(6): 1-5.
- [12] 李益琴, 孙建锐. 基于能量回馈的港口 RTG 节能低碳技术[J]. 起重运输机械, 2020(11): 35-38.

(本文编辑 王璁)