

虚拟电厂设计实现与可调节能力验证评估方法研究

翁志远¹, 彭伟¹, 俞而越², 袁潇洋³

- 中国电信上海公司智能云网操作维护中心, 上海 200081;
- 中国电信上海公司总工程师办公室, 上海 200122;
- 上海邮电设计咨询研究院有限公司, 上海 200092)

摘要: 聚焦于虚拟电厂系统的开发设计, 并在此基础上, 创造性地探索了柴油发电机作为长期备用电源在智能电网中的新应用模式——接入虚拟电厂。首先, 全方位分析了虚拟电厂的总体设计与功能架构, 为虚拟电厂的设计与应用提供参考价值和实践指导。随后, 提出了3种创新的柴油发电机接入虚拟电厂的技术模式, 为柴油发电机在智能电网中的有效集成提供了新思路。最后, 利用中国电信上海分公司某局的备用柴油发电机, 通过实际测试收集了丰富的实测数据, 验证了柴油发电机接入虚拟电厂中的可行性和供电安全性。

关键词: 虚拟电厂; 平台设计; 柴油发电机; 接入技术模式

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025087

0 引言

当前, 虚拟电厂 (VPP) 是国家开展新型电力系统建设, 实现“双碳”目标的一个重要建设方向, 其在破解清洁能源消纳难题、绿色能源转型方面发挥着重要作用。

上海市作为国家首批虚拟电厂建设试点省市之一, 积极响应国家号召, 致力于发展虚拟电厂新业态, 利用先进的计量、通信、控制等技术, 对分布式异构能源进行聚合, 实现自动化远程调度、精准化智能分析和便捷化市场交易, 推动构建虚拟电厂产业链条。在此背景下, “上海电信虚拟电厂”平台应运而生, 该平台不但对外能实现与市级虚拟电厂平台对接并接受调度指令, 而且对内能实现与自有油机、空调、储能协调调度功能, 为电力系统的灵活性与可靠性提供了有力支撑。

另一方面, 柴油发电机作为传统但可靠的发电设备, 在数据中心等关键基础设施中扮演着重要角色。然而, 其长期处于备用状态导致的设备利用率偏低, 运行经济性较差。以上海电信为例, 根据相关规范, 算力基础设施及重要通信保障负荷需至少按 1:1 配置柴油发电机作为应急备用。在电网供电可靠性较高区域, 这些柴油发电机长期处于备用状态, 设备利用率偏低, 潜在的可调节负荷资源丰富。若能将这部分资源有效整合并接入虚拟电厂, 参与电网调度并辅助服务市场, 不仅能显著提升设备利用率和经济性, 还能在保障数据中心高可靠供电的同时, 为电网提供削峰填谷的支撑, 实现能源的综合利用与效益最大化。

虚拟电厂作为未来智能电网的重要组成部分, 近年来受到广泛关注与深入研究。现有研究主要集中在优化调度技术研究和收益分配策略研



究两个角度上。然而，针对虚拟电厂系统开发和柴油发电机接入虚拟电厂的这一特定领域的专项研究尚显不足。目前，鲜有文献直接聚焦于虚拟电厂系统开发设计与柴油发电机接入虚拟电厂的技术模式、调控策略及性能评估。这一研究空白不仅限制了虚拟电厂的进一步发展，也未能充分挖掘柴油发电机在电网中的潜在价值。

鉴于当前研究的不足，本研究将以上海电信为例，围绕虚拟电厂平台设计实现与柴油发电机资源接入模式展开，通过技术创新和实践验证，本研究旨在填补该领域的研究空白，为未来虚拟电厂的建设和运营提供重要的参考依据。具体而言，本文的主要工作内容与创新点如下：（1）深入研究虚拟电厂系统的开发设计；（2）提出了3种柴油发电机接入虚拟电厂的技术模式；（3）通过实际测试，收集了丰富的实测数据，验证了柴油发电机在虚拟电厂中的调度响应能力和供电稳定性。

1 虚拟电厂平台设计与实现

1.1 总体设计

虚拟电厂基于大数据、云计算、物联网等技术，采用“云、管、边、端”架构设计，旨在构

建一个高效、安全、可扩展的虚拟电厂管理系统。该系统不仅实现了负荷资源设备的无缝接入、实时数据交互与业务管理，还确保了数据信息安全，满足了虚拟电厂对数据高速采集、快速处理及安全存储的严格要求。同时，平台与上海虚拟电厂运营管控平台深度对接，确保聚合商准入资格的顺利获取，促进了生态体系的融合发展。虚拟电厂总体架构如图1所示。

1.2 功能架构

虚拟电厂系统由多个关键应用功能模块组成，包括智慧能源物联管理中心、数据交换中心、负荷资源管理、负荷资源监测、响应邀约管理及运营分析等。平台支持基于物联采集技术，通过智慧能源物联管理中心，实现对楼宇空调、柴油发电机组、基站储能等发电设备的直接数据采集和调控。同时也支持通过系统对系统的方式，与动环系统、双碳/能耗管控系统、上海市虚拟电厂运营管控平台等实现数据交换。虚拟电厂系统功能架构如图2所示。

1.3 功能模块

1.3.1 基础功能类模块

负荷资源管理模块负责维护虚拟电厂的档案

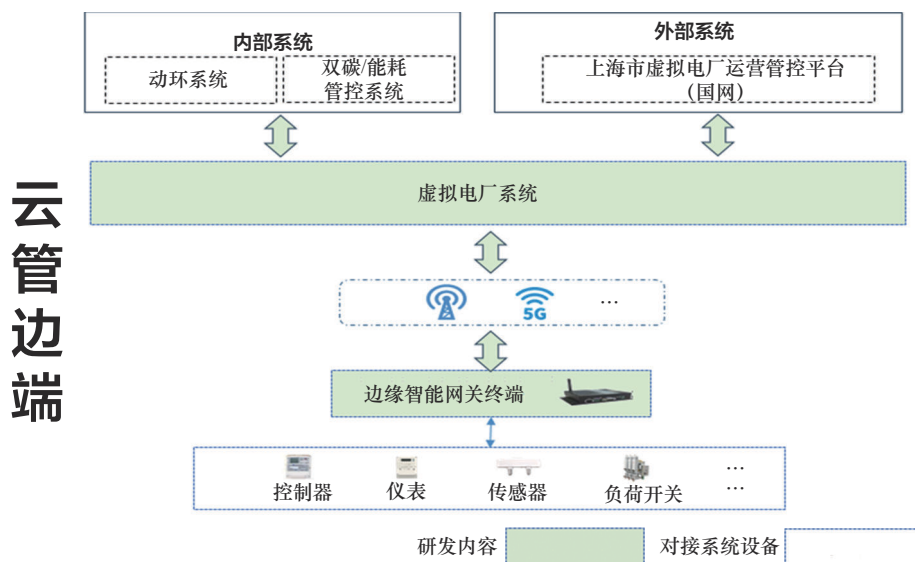


图1 虚拟电厂总体架构

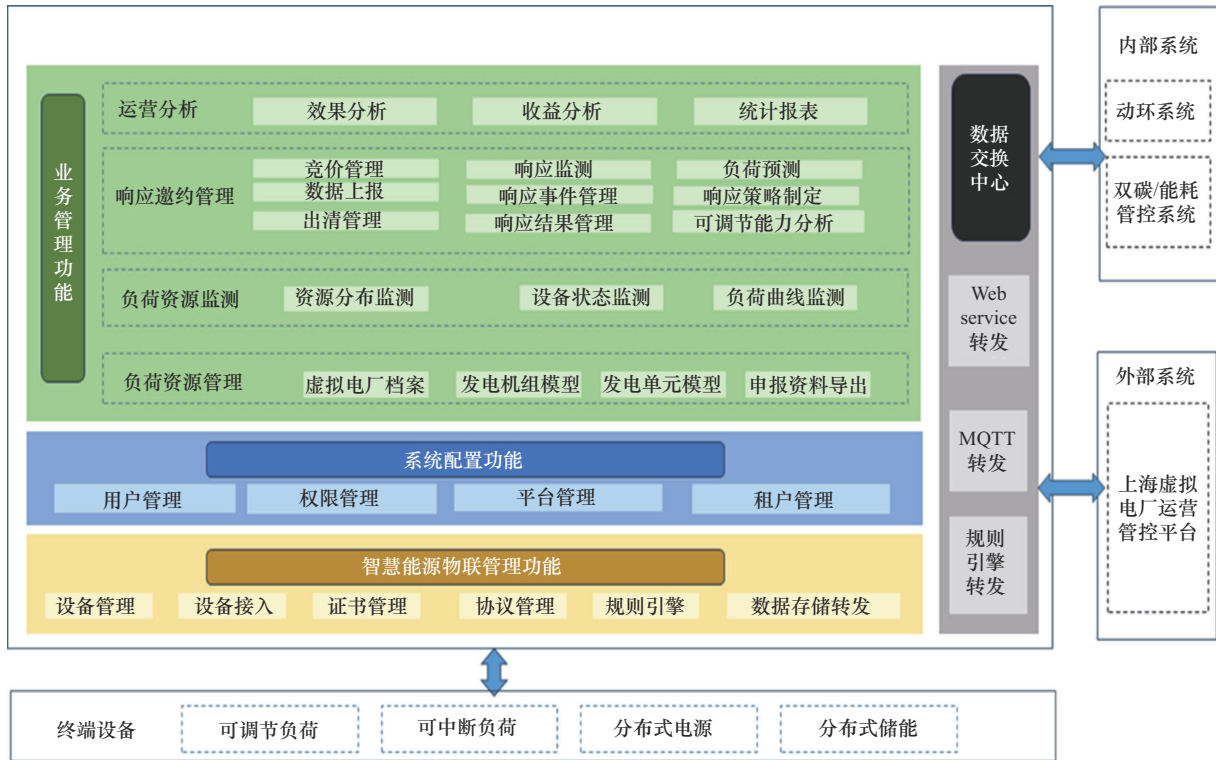


图2 虚拟电厂系统功能架构

体系，包括但不限于发电厂档案、发电机组档案、发电单元档案等基础信息。

负荷资源监测模块则可以针对接入平台的可调节负荷资源，采用先进的地图定位与图形化展示技术，直观呈现资源的分布情况、实时状态以及负荷曲线，为运营人员提供直观、全面的资源视图。

1.3.2 智能决策类模块

响应邀约管理模块是虚拟电厂平台的核心，它集成了从电力需求响应事件的接收、竞价参与、邀约响应到策略执行、监测反馈、数据上报及结果汇总的全流程管理功能。当接收到电力需求响应事件时，模块能够迅速分析市场状况与自身资源情况，制定并执行最优的响应策略，此外，可以通过实时监测响应过程，确保各项指令的准确执行与资源的有效调配，对响应时间进行有效管理。同时，模块还具备强大的数据汇总与分析能力，能够为后续的评估与改进提供有力支

持。其中，值得一提的是负荷预测与可调节能力负荷预测功能。

(1) 负荷预测：基于历史信息、生产计划，利用负荷预测模型，按日前、日内、实时预测各发电单元的负荷信息。

(2) 可调节能力负荷预测：基于可调节能力负荷预测模型，按日前、日内、实时预测各发电单元的可调节能力负荷信息。

1.3.3 智能分析类模块

运营分析模块负责对虚拟电厂参与历次需求响应事件的成效以及虚拟电厂总体运营情况进行统计分析，包括效果评估、收益分析、统计报表等。

2 柴油发电机接入虚拟电厂技术方案

综合上海电信现有数据中心的调研情况，数据中心柴油发电机参与虚拟电厂调用可以通过以下3种模式实现：柴油发电机孤网运行、柴油发



电机启动短时并网后自动切换至孤网运行、柴油发电机并网运行。

2.1 模式一：柴油发电机孤网运行

市电电源失电，柴油发电机启动带负载，断开市电母线进线开关后，处于孤网运行状态。这种模式不需要进行设备改造，可直接参与虚拟电厂调用，但推进风险和难度较大。首先，从市电缺失到柴油发电机启动带负载的这段时间，数据中心依靠不间断电源（UPS）供电，若在参与虚拟电厂调用过程中，因UPS蓄电池组故障影响数据中心运行，造成的损失目前难以估算。其次，对于现有柴油发电系统是否能满载安全稳定运行的问题缺少实际验证。最后，从市电供电切换到柴油发电机启动带负载的这段时间，需要通知到每个用户，且操作规程复杂，全程需要两个小时以上。

2.2 模式二：柴油发电机启动短时并网后自动切换至孤网运行

柴油发电机利用具备同期、负荷分配功能的并机装置短期并网，在将负荷移至柴油发电机后切断市电供应，使其孤网运行，UPS作为柴油发电机的后备支撑电源。该种模式退网时短期并网，缓慢降低柴油发电机出力，等负荷移至市电供应后柴油发电机退出，规避了电源切换期间使用UPS供电的潜在风险，但对于不具备相应功能的并机装置，需要进行改造。

2.3 模式三：柴油发电机并网运行

柴油发电机利用具备同期、负荷分配功能的并机装置在虚拟电厂调节期间一直处于并网运行状态，柴油发电机承担一部分的数据中心负荷供

电，不够的由市电来支撑。柴油发电机并网运行避免了柴油发电机与市电相互切换间隙需要通过UPS供电的情况，而且市电全程作为备用电源，能提高数据中心供电系统的可靠性及柴油发电系统的可用性，也能更加安全、便捷地参与虚拟电厂调节，但目前该模式缺少相关政策文件支持。该模式下柴油发电机并网也有两种方式，一种是利用具备同期、负荷分配功能的并机装置整组并网，该方式下多台柴油发电机为一组同时并网；另一种可利用一套同期装置，通过顺控程序将柴油发电机依次单台直接并网，相较于前一种方式，调节灵活性较高。

2.4 不同接入方案优缺点分析

综合分析来看，3种模式的适用场景、改造方案等有所差别。因而在实际运用时，应综合多项因素综合选择。柴油发电机参数见表1。

3 柴油发电机参与虚拟电厂可行性的验证

鉴于柴油发电机在虚拟电厂及孤网模式下运行具有复杂性，本文对上海电信某局柴油发电机进行对应试验，以评估柴油发电机参与虚拟电厂调用的可行性和在孤网模式下供电的安全可靠性。

3.1 柴油发电机运行特性分析

柴油发电机在电网中扮演着重要的角色，特别是在紧急情况下或电网不稳定时，其出力作用尤为关键。在电网正常运行时，柴油发电机通常处于待机或备用状态。然而，一旦电网发生故障、停电或者电力需求激增时，柴油发电机能够通过自动切换装置迅速启动并接入电网，为关键负载提供电力，确保电力供应的连续性和稳定性。

表1 柴油发电机参数

特点	模式一	模式二	模式三
适用场景	适用于允许采用UPS短时支撑供电、柴发孤网运行的数据中心	适用于对于柴发与市电切换时采用UPS短时支撑供电存在担忧，但允许柴发孤网运行的数据中心	适用于所有的数据中心
改造需求	数据中心柴发机组满足孤网运行要求，无须改造	数据中心柴发需要整组同期并网功能，并可自动分配负荷。如不满足需要对柴发系统进行改造	数据中心柴发需要具备同期并网功能，如不满足需要对柴发系统进行改造

3.2 试验执行

3.2.1 试验对象及范围

本研究利用中国电信上海公司某局配有的一台备用柴油发电机进行实际测试。其为一台容量为500 kVA，有功480 kW的备用柴油发电机电源。机房采用两路10 kV高压进线，经两个高压室内高压降压变压器降压后，输出两路400 V至低压配电室，经低压配电室内配电系统分配后，输出两路至电力室，一路供给通信用电，一路供给空调用电，两路通信用电和两路空调用电与一路柴油发电机组组成切换系统，此次调用目标容量200 kW。柴油发电机参数见表2。

表2 柴油发电机参数

序号	机组品牌	装机容量	输出方式	覆盖范围
1	卡特彼勒	1 800 kW	三相无刷	1#2#变压器

本次试验涉及范围为上海电信某局1#、2#变压器二路市电供电系统。

3.4.2 实验安排

本次试验选用TK 5024型的便携式录波仪作为测量仪器，测量柴油发电机去乙段母线PT、CT信号及市电去乙段母线PT、CT信号，采集频率则设定为1分钟1次。另外需要的其他仪器设备有万用表、试验用导线若干，拖线盘、插排等。

3.3 结果分析

利用现场实际采集的响应数据进行分析，其调用日响应曲线如图3所示。

由于宝山电信柴油发电机是通过模式一孤网模式参与虚拟电厂调用，因此调节容量为实时出力。对响应数据进行分析可知，在响应时段内柴油发电机的最大调节容量 P_{max} 为204.06 kW，最小调节容量 P_{min} 为170.6 kW，持续时间60 min，平均调节容量 P_{avg} 为186.36 kW。由此可见，柴油发电机在用时高峰时段10:00-11:00内，用电负荷整体平稳，执行曲线良好；最大调节容量超过了目标值，总体满足目标调节容量的要求。综上所述可以认定其圆满完成响应任务。

4 结束语

本文围绕虚拟电厂系统的开发设计与柴油发电机接入虚拟电厂的接入模式展开了深入探索，通过理论分析与实际测试相结合的方式，取得了以下主要结论。

- (1) 本文深入剖析了虚拟电厂的总体设计思路、功能架构以及具体功能模块，为虚拟电厂系统的后续开发设计与实现提供了宝贵的实践参考与理论支撑。
- (2) 本文提出了3种柴油发电机接入虚拟电厂的技术模式，并且讨论了3种模式的应用场景

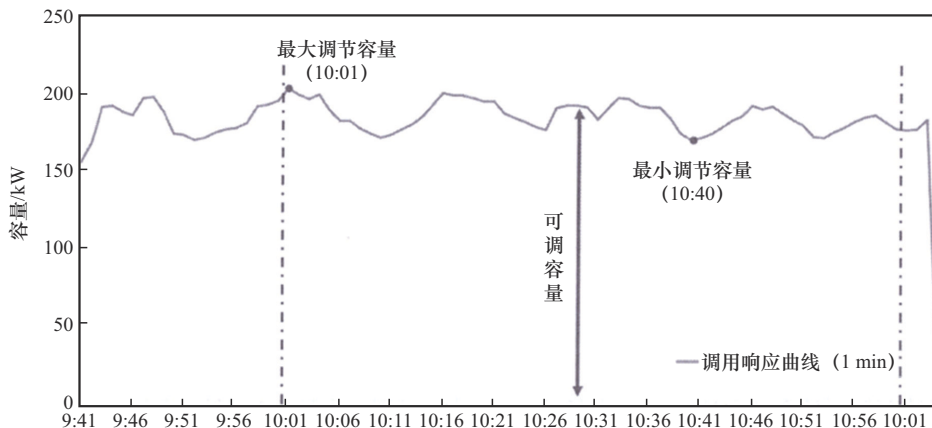


图3 上海电信某局调用日响应曲线(调用时段10:00-11:00)



与优势,为柴油发电机在智能电网中的高效集成提供了有效方案,拓展了其应用范围。

(3) 基于上海电信某局实际测试和数据收集,本文验证了柴油发电机在虚拟电厂中运行的稳定性与可靠性。

综上所述,本文聚焦于虚拟电厂系统的开发设计,通过全面展示虚拟电厂的总体设计与功能架构以及深入探索柴油发电机接入该系统的接入模式及可行性,不仅为虚拟电厂在未来的大规模应用与广泛推广奠定了坚实的基础,也为柴油发电机在智能电网中的高效集成提供了有效方案,为未来虚拟电厂的建设、架构优化及高效运营提供了重要的理论支撑与实践参考。

参考文献:

- [1] 张杰. 含分布式能源的虚拟电厂优化调度及收益分配策略研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- [2] 赵斌. 含柴油发电机的分布式独立交流微电网研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [3] 李翔宇. 虚拟电厂灵活可调资源优化配置与多层级协同优化调度[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [4] 吴庚奇. 双碳目标下考虑碳交易的虚拟电厂优化调度研究[D].

北京: 华北电力大学, 2023.

- [5] 张胤涵. 面向系统灵活性需求的虚拟电厂主动响应模型研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- [6] 王冠然. 含电动汽车的虚拟电厂运行优化与效益评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [7] 梅书凡. 市场条件下含多种分布式能源的虚拟电厂运营优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [8] 张丽娟, 保富. 含分布式新能源的多虚拟电厂协同运行研究[J]. 电测与仪表, 2024.
- [9] 许树港. 考虑多种类型分布式能源的虚拟电厂优化调度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.

[作者简介]

翁志远 (1974-), 男, 中国电信上海公司智能云网操作维护中心高级工程师, 能源与监控支撑室主任, 主要研究方向为动环监控体系建设、监控数据采集技术、监控组网技术等。

彭伟 (1972-), 男, 中国电信上海公司智能云网操作维护中心高级工程师, 电源空调运行中心主任, 主要研究方向为基础设施体系、动环监控体系、智能网管等。

俞而越 (1996-), 男, 中国电信上海公司总工程师办公室工程师、技术主管, 主要研究方向为基础设施体系, 动环监控技术、监控标准化研究等。

袁潇洋 (1994-), 男, 上海邮电设计咨询研究院有限公司助理工程师, 数碳咨询所所长, 主要研究方向为绿色节能、双碳能源经济学等。