

燃气和柴油混合驱动的油气田压裂作业中 电驱动力装备的运行优化研究

孙红斌, 郝利华, 康雷朋

(中国石油集团济柴动力有限公司, 250306)

摘要: 燃气动力广泛应用于油气开采领域, 其节能降耗技术开发是当前产业发展的重点工作。油气田压裂作业具有负荷容量大、随机突变性强、作业间歇多等特点, 需要较大容量的内燃机群为其提供动力, 能耗问题比较突出。某压裂现场使用了 28 台 300KW 燃气发电机组, 为 3 台 5000hp 的电驱压裂撬供电。基于压裂的间歇性作业特点, 利用远程控制系统实施燃气机组群的快速启停调控, 以实现作业微电网电驱系统能源利用效率的提升。建立验证试验的数学模型, 分析试验各阶段的燃气机组燃气消耗和电能有效利用情况, 开展了常规调控和运行优化调控模式下的试验工作。试验发现, 由于快速启停操作方式的采用和对应性减少压裂等停阶段燃气机组运行数量的优化工作, 使得燃气空载消耗大幅降低, 压裂等停阶段燃气发电的利用效率提高了 32.8% (根据本文设定并计算的参考依据), 电驱动力装备的运行大为优化。

关键词: 电驱压裂; 燃气发电机组; 能源利用效率; 运行优化

中图分类号: TK261

文章编号: 1000-6494 (2025) 02-0054-07

Study on Operation Optimization of Electric Drive Equipment in Oil and Gas Field Fracturing Operation Driven by Gas and Diesel Oil

SUN Hongbin, HAO Lihua, KANG Leipeng

(CNPC Jichai Power Company Limited, Jinan, Shandong 250306)

Abstract: Gas power is widely used in the field of oil and gas exploitation, and its energy-saving and consumption-reducing technology development is the key work of current industrial development. The fracturing operation in oil and gas fields has the characteristics of large load capacity, strong random mutation and many intermittent operations, and it needs a large-capacity internal combustion engine group to provide power, so the energy consumption problem is more prominent. Twenty-eight 300KW gas generator sets were used in a fracturing site to supply power for three 5000hp electric drive fracturing skids. Based on the intermittent operation characteristics of fracturing, the remote control system is used to implement the rapid start-stop regulation of gas generating units, so as to improve the energy utilization efficiency of the electric drive system of operating microgrid. The mathematical model of the test is established, and the gas consumption and effective utilization of electric energy of gas turbine in each stage of the test are analyzed, and the test work under the conventional regulation and optimization regulation mode is carried out. It is found that the adoption of quick start-stop control mode and the corresponding optimization work to reduce the number of gas units in the stop phase such as fracturing greatly reduce the no-load consumption of gas, improve the utilization efficiency of gas power generation in the stop phase such as fracturing by 32.8% (based on the reference criteria set and calculated in this article), and greatly optimize the operation of electric driving equipment.

Keywords: electric drive fracturing; gas generator set; energy utilization efficiency; operation optimization

DOI: 10.20082/j.cnki.nrj.2025.02.008

收稿日期: 2025 年 3 月 20 日

作者简介: 孙红斌 (1984-), 男, 本科, 高级技师, 研究方向为发动机控制、发电机组控制及电站控制技术, Email: 312689844@qq.com

0 前言

由于地球环境“恶化”和资源“枯竭”的潜在威胁,产业界对环保和可持续发展的发展要求越来越高。能源的高效利用,是保护地球环境和实现可持续发展的有效手段和方式。内燃机行业也坚持不懈朝着提升内燃机性能,减少资源消耗的发展方向而努力。

文献[1]通过STAR CCM+软件对相关发动机进气歧管进行三维CFD稳态均匀性模拟分析,以实现平均流量系数相对偏差 $\leq \pm 2.5\%$ 的要求,试验中各缸的EGR率波动较小,优化后的进气总管各缸EGR率均匀性在2.0%以内,证明了优化后各缸的EGR率的均匀性较好,发动机的性能得到有效提升。

文献[2]利用AspenPlus软件建立了基于9F级燃气-蒸汽联合循环机组的模型,分析了向甲烷中添加 H_2 对联合循环效率的影响。结果显示,随着 H_2 质量分数的增加,联合循环整体输出功率和效率得到了提升。

文献[3]研究了大功率天然气发动机稀薄燃烧技术及预燃室点火控制对发动机性能的影响,通过三种试验方案,探讨了预燃室进气喷射提前角、压力和持续期对发动机性能的影响。该研究为大功率天然气发动机性能优化提供了技术依据。

文献[4]探讨了低弹力活塞环对活塞漏气量、比油耗和机油耗的影响。结果表明降低二道环的弹力对漏气量和机油耗无明显影响。采用低弹力活塞环组试验,最大降低油耗达8%,节能减排作用显著。

以上典型研究均是从发动机自身性能角度出发,通过研发创新有效提高了相应发动机的运行能效。文献[5]提出,发动机运行经济性的影响因素是多种多样的,发动机的单机带载率和抗负载冲击性能等负载相关因素的影响也是巨大的。对于油气田压裂作业这样的功率波动大、波动频繁的应用场景,上述负载端相关因素尤其关键。因此,合理调整发动机的带载率以及减少机组空载损耗同样可以大幅减少能源消耗,提升运行经济性,且运行优化方式的见效更快、空间更大。基于油气田压裂作

业功率大、间隙作业等工作特点,其发电和负载的平衡运行以及能源综合利用效率的运行优化研究值得关注。

1 压裂作业动力装备发展及其运行效能提升工作进展

1.1 压裂的作用

压裂是开发低渗透油气田的一种重要开采技术,可以在复杂地质条件下进行开采。在油藏条件较差的地区,通过压裂可以增加石油和天然气的产量^[6]。

低渗透油田指的是那些具有低渗透性储层的油田,其特点是储层内部的孔隙非常细小,渗透率通常低于1毫达西^[7]。这类油井的地层渗透率较低,导致油气资源难以有效开采。通过压裂技术,可以向地层中注入高压液体,使地层岩石产生裂缝并形成网状结构,从而增加地层的渗透率,从而达到石油增产的目的。

2.2 压裂作业的工况特点

压裂作业中,由压裂撬将压裂液输送到高压管汇并逐步增压。压裂作业可分为三个阶段^[8]:当井底压力达到 p_F (地层破裂压力)后地层破裂;之后在 p_E (裂缝延伸压力)下将具有一定粒度的颗粒材料注入地层使裂缝持续延伸;泵停机后井底压力下降为 p_s (地层压力)。井下压裂过程中井底压力的变化情况如图1所示。

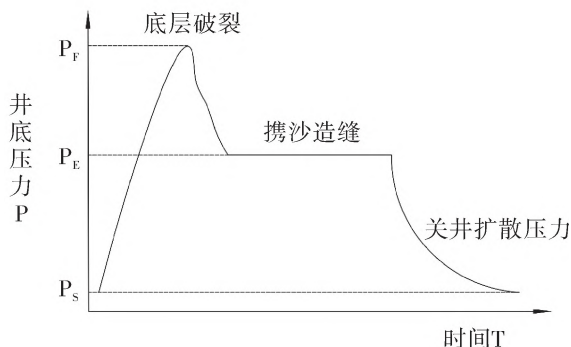


图1 井下压裂作业过程及井底压力变化规律

1.3 压裂动力装备发展与运行效能提升工作进展

传统的压裂是以柴油机驱动的压裂车为主,柴油压裂车普遍存在噪音大、污染高、成本高等问题。随着科技的发展和电网的完备,电驱压裂逐渐

成为新的趋势。

为了满足页岩气开采的高压力、大排量、大功率、绿色智能化的要求,夏梁志等^[9]研制了 5500HP 新型大功率电驱压裂系统,该电驱压裂系统的成功研制及运用引领了我国电驱压裂施工从“柴油驱动时代”进一步迈向“电动、绿色、智能时代”。

李双鹏等^[10]提出一种低压交流大功率电驱动压裂车,从技术参数、整车结构、关键技术及试验情况等方面介绍了国内研制的 2500 型电驱动压裂车。分析表明,与传统的柴油驱动压裂车相比,电驱动压裂车在节能减排和经济指标具有更大的优势,同时兼顾车载结构的良好道路移运性能,适合于目前页岩气低成本大规模开发。

武平^[11]建立压裂效率评价方法,通过引入电驱压裂装备开展电驱压裂的定量分析,发现电驱在提速提效方面效果显著:泵液效率和加砂效率分别较非电驱提高 14.4% 和 22.66%,装备及运行成本减少 23.57%,同时解决了传统设备能耗高、噪声大等问题。

当前,压裂动力装备由柴驱压裂逐渐转变为节能环保的电驱压裂,纯电驱对电网的要求较高。但因油田压裂属于非常规负荷作业^[12],具有负载容量大、随机突变性强等特点,给电网运行管理带来了难度。特别是在电网不发达的偏远地区,可以考虑采用燃气发电的方式给电驱系统供电。

2 “柴驱+燃气动力”压裂作业中电驱装备运行效能提升开发

2.1 项目工作背景及电驱装备能源利用效率试验体系

2.1.1 “柴驱+燃气动力”的压裂装备组成新模式

某压裂队原先使用 25 台 2500hp 柴油驱动压裂车进行压裂,柴油压裂车普遍存在噪音大、污染高、成本高等问题,为响应节能减排要求,后逐步使用燃气动力代替部分柴油驱动压裂车,最终组成了由 19 个 2500hp 柴油压裂车和 3 个 5000Hp 电驱压裂泵构成的装备体系。3 台电驱压裂撬是由山东某厂生产的 YLQ140-5000D 型压裂撬,电机最大

功率 3728KW。电驱压裂由 28 台 300KW 燃气发电机组进行供电。项目现场压裂设备布置如图 2,燃气发电机组工作参数如表 1 所示。

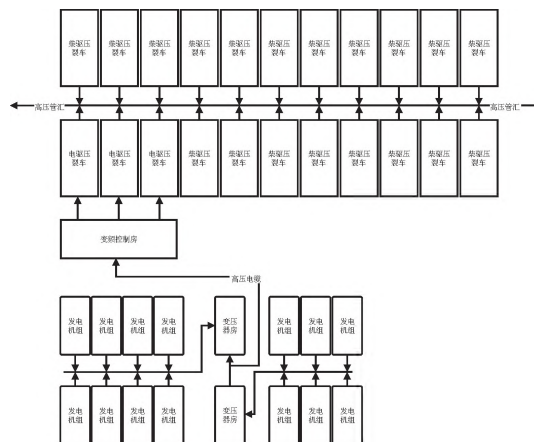


图 2 某项目压裂现场设备布置图

表 1 某压裂项目电驱系统燃气发电机组性能参数

项目	参数
产品型号	300GF31-T
功率/kW	300
转速/(r·min ⁻¹)	1500
频率/Hz	50
电压/v	600
功率因素	0.7

2.1.2 电驱装备能源利用效率试验体系

组建电驱压裂作业动力装备试验体系,建立能源利用效率试验监控系统,对压裂工况变化和电驱机组负载变化进行记录和分析。试验中需着重观测记录压裂工况变化、电驱机组功率、燃气消耗量、工作时长等相关试验数据。

试验中压裂工况各阶段的电驱装备平均能源利用效率(参考依据)设定为 $\eta_{mean, stage}$, 可分阶段按如下式(1)计算。

$$\eta_{mean, stage} = \frac{Q_{power, stage}}{Q_{gas, stage}} \quad (1)$$

式中, $Q_{power, stage}$ 为电驱有效负荷用电量; $Q_{gas, stage}$ 为电驱系统 28 台燃气机组的燃气耗气量。

2.2 常规动力调控模式下电驱装备系统的能源利用效率

按既有的压裂作业微电网动力装备的常规调控模式开展基础运行试验,试验数据如表 2 所示,压裂作业负载变化与作业时间的关系如图 3 所示。

表 2 某压裂项目电驱系统常规调控

模式下运行试验数据汇总表				
工况	用电量 /kWh	用气量/ m ³	用时/ min	能源利用效率
等停 1	1725	838	120	2.06
压裂施工 1	6817	1988	80	3.43
等停 2	1550	795	110	1.95
压裂施工 2	7834	2274	80	3.45
等停 3	1314	718	120	1.83
压裂施工 3	9785	2810	120	3.48
等停 4	1259	575	120	2.19
压裂施工 4	11858	3525	140	3.36
等停 5	1114	820	120	1.36

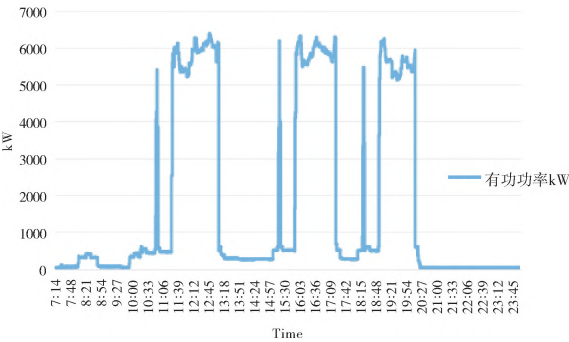


图 3 某压裂项目压裂作业负载变化情况

图中可见, 压裂作业负载变化过程呈现出明显的 3 阶段特征, 其作业过程还具有显著的间歇性特点。间歇过程中主要实施对压裂设备的检查和维护, 以确保设备处于良好的工作状态。相关工作包括检查泵的压力和流量、管道的密封性、仪表的读数, 以及更换磨损的部件和清洁设备等。

在压裂间歇阶段, 电驱系统的燃气内燃机几乎完全处于空载状态, 从而形成了低效的作业工作区间。压裂作业各工况阶段运行试验数据及按公式 (1) 计算的电驱系统能源利用效率分析结果如表 2 所示, 试验得到的压裂作业全过程各工况阶段电驱系统的能源利用效率也同时采用柱状图形式来体现, 如图 4。电驱系统等停全过程的综合能源利用效率 (参考依据) 可简化按照公式 (2) 并依据表 2 中的监控数据计算而得。

$$\eta_{\text{mean, idle}} = \frac{Q_{\text{pove, idle1}} + Q_{\text{pove, idle2}} + Q_{\text{pove, idle3}} + Q_{\text{pove, idle4}} + Q_{\text{pove, idle5}}}{Q_{\text{gas, idle1}} + Q_{\text{gas, idle2}} + Q_{\text{gas, idle3}} + Q_{\text{gas, idle4}} + Q_{\text{gas, idle5}}} \quad (2)$$

(计算: $\frac{1725+1550+1314+1259+1114}{838+795+718+575+820} \approx 1.86$)

从数据上看, 在压裂施工阶段, 燃气内燃机基

本处于满载状态, 能源利用效率比较高, 达到 3.5 左右, 基本达到燃气发动机的效率上限。但是在压裂等停的非工作时间, 燃气内燃机基本处于空载状态, 总体能源利用效率不足 2。而且, 压裂作业中间等停的非工作时段越长, 对能源利用的负面影响越大, 会导致整个电驱系统微电网的运行效率被拉低。

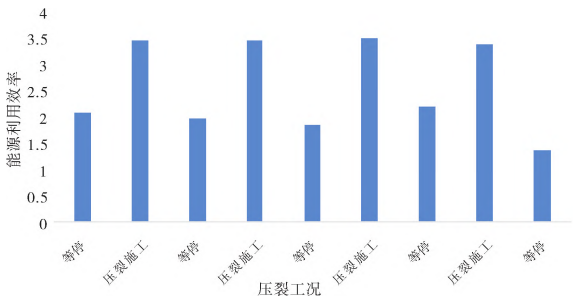


图 4 某压裂项目压裂作业各工况阶段电驱系统
常规调控模式下的能源利用效率

2.3 电驱装备系统能源利用效率的提升途径

压裂等停阶段的平均能源利用效率 (参考依据) 设定为 $\eta_{\text{mean, idle}}$, 下式 (3) 进行分析。

$$\eta_{\text{mean, idle}} = \frac{Q_{\text{pove, idle}}}{Q_{\text{gas, idle}}} = \frac{Q_{\text{pove, idle}}}{N_{\text{num}} \times q_{\text{gas}}} \quad (3)$$

式中, $Q_{\text{pove, idle}}$ 为等停阶段有效负荷用电量; $Q_{\text{gas, idle}}$ 为 28 台机组的燃气耗气量; q_{gas} 为单台机组的燃气耗气量; N_{num} 为机组运行设备数量。

实际上, 要想使空载等停时的机组运行效率提高, 在发电量需求不变的情况下, 可以减少压裂等停时机组的运行数量 N_{run} , 提高单机带载率, 这样就能够达成减少机组燃气消耗, 提高压裂等停阶段的能源综合利用效率 $\eta_{\text{mean, idle}}$ 的目的。

2.3.1 频繁操作和操作耗时的影响

频繁的启停机组, 会因操作耗时而影响工作效率, 并可能影响压裂作业的稳定供电, 也会给机组带来不必要的设备磨损。因此, 应联系机组自身的启停操作性能和微电网综合管理的控制能力状况来确定压裂等停阶段启动停机操作的有效性, 操作因素会影响调控策略。

从操作耗时角度出发作评估, 压裂等停时间可看做由 3 部分构成, 如式 (4)。

$$T_{\text{idle}} = T_{\text{start}} + T_{\text{stop}} + T_{\text{eff}} \quad (4)$$

式中, T_{idle} 为压裂等停时间; T_{start} 为燃气机群实施启动操作的耗时, 即从开始实施启动操作到合闸送电时刻的持续时间; T_{stop} 为燃气机群实施停机

操作的耗时, 即从开始实施分闸解列到机组停机时刻持续的时间; T_{eff} 为燃气机群的有效停机时间。

原则上只要满足 $T_{idle} > T_{start} + T_{stop}$, 就存在基于操控耗时评估的有效停机时间, 即实际实施的压裂等停时间大于门槛值的情况下, 从操作耗时的因素考虑的燃气机群停机的操作才具备可行性。

如果单台机组的启动耗时为 t , 机组群 N 台机组全部依次启动需要的时间为 Nt , 其操作需要占用大量的时间。如果启动和停止的操作耗时过长, 则燃气机群的有效停机时间 T_{eff} 就会缩短。当然, 频繁操作也会增加运行人员的操作负担。项目运行前期常规调控模式下, 操作人员按就地手动模式来操作, 28 台机组的启停、并列和解列操作需要 30 分钟以上。因此, 应利用计算机遥控技术, 实现燃气机群的远程启停, 并开发一键多机的并行操作模式, 这样就可通过多台机组的远程并行操作大幅缩短机组的启动操作耗时 T_{start} 和停止操作耗时 T_{stop} 。

2.3.2 计算机遥控系统的开发

微电网综合管理能力对压裂等停阶段启动停机操作的有效性和保障项目运行的可靠性有重大影响。

利用计算机遥控系统建立快速、自动化的控制操作能力, 以减少人工操作对操作效率的影响, 实现燃气机组起机和停机的快速操作和优化调度。

系统主要基于工业级监控平台, 采用工业以太网有线传输介质构建环形冗余拓扑架构, 确保通讯链路稳定可靠。该系统的功能建设中, 也纳入了一键多机控制逻辑。该系统具备对 28 台分布式机组下发远程启动、并机、解列、停机等信号的多方式综合控制能力。计算机遥控系统控制界面如图 5。

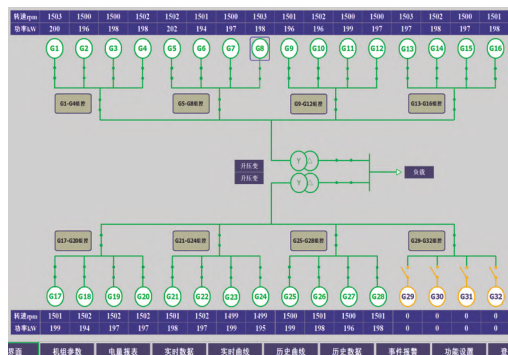


图 5 计算机遥控系统控制界面

2.4 优化方案的实际应用和试验分析

采用计算机遥控系统控制启停与合理确定启停触发策略是电驱系统运行优化方案的两个重要内

容。在该项目现场开展了优化方案实际应用和试验分析。

2.4.1 实际应用的优化工作方案

1) 计算机遥控系统控制启停的操控方案

计算机遥控系统的功能建设中, 纳入了一键多机控制逻辑。但在计算资源恒定、建设方案和经费投入不变的情况下, 过多的机组同时执行遥控操作会导致对系统资源的过度竞争, 存在控制失效的风险。为了防止多台机组并行操作时出现资源过度竞争, 避免通讯数据延时和数据丢包问题, 该项目现场实际应用的计算机遥控系统采用了分组操作控制策略, 单次并行操作数量最大为 4 台机组, 分 7 次完成全部机组操作。

实际应用中, 该系统可以做到从接收开机指令到 28 台机组全部并网送电全过程耗时仅需要 3 分钟。减少操作耗时意味着机组能够更快地投入发电作业, 从而提高了整体运行效率; 该系统的启用也有效减少了手动操作的劳动需求。总体上, 该系统的投用大幅提高了项目分布式燃气机集群的运行管理水平。

2) 计算机遥控系统控制启停的启动机制

首先, 应尽量缩短空载待机的时间, 或者说应尽量避免空载待机。单段压裂作业结束后会出现较长的等停时间, 该时间段 28 台机组一直处于空载运行。减少多余机组待机时间, 提高剩余机组单机带载率, 可以直接降低电驱系统的运行能耗。尤其在电力供应紧张或能源成本较高的地区, 减少空载待机时间能够显著降低运营成本。另, 由于长期运行可能导致机组内部元件老化、性能下降, 甚至引发故障, 因此, 减少空载待机时间有助于延长机组的使用寿命, 减少维修和部件更换成本。

其次, 启停操作的耗时会影响执行停机操作的可行性, 存在一个门槛值。通过计算机遥控系统远程快速并行操作启停, 可以将 T_{start} 与 T_{stop} 均控制在 3 分钟之内。而只要 $T_{idle} > T_{start} + T_{stop}$, 就具备在压裂等停的阶段对机组群进行停机操作的可行性。因此, 原则上压裂等停时间 T_{idle} 只要大于 6 分钟的门槛值就可以触发停机操作。

第三, 停机操作具有系统性的影响, 而不只应考虑操作耗时和系统局部的节能降耗。在该项目实际应用工作中, 为了减少机组因频繁启停可能造成

的附带损害和降低受系统启停操作影响人员的关联性操作频次, 最终将压裂等停时间 T_{idle} 的触发时间门槛值定在 30 分钟, 此状态下才会进行停机操作。这样, 既维持了压裂等停期间的运行供电, 降低了能源损耗, 又保证了机组保持好快速满负荷投入运行的保障能力, 且具备操作可行性。

2.4.2 优化方案的试验分析

机组远程控制技术的实施, 提高了机组供电的快速响应能力。通过减少发电机组的低效运行时间, 提升了电驱系统的整体能源利用效率。相应试验情况分析如下。

优化方案实际应用的试验数据如表 3。

表 3 优化方案试验数据汇总表				
工况	用电量 /kWh	用气量/ m ³	用时/ min	能源利 用效率
等停 1	1010	398	120	2.54
压裂施工 1	7913	2415	110	3.28
等停 2	941	392	120	2.40
压裂施工 2	7175	2087	80	3.44
等停 3	662	290	80	2.28
压裂施工 3	11385	3370	140	3.38
等停 4	1245	443	80	2.81
压裂施工 4	8944	2658	110	3.36
等停 5	951	421	120	2.26

优化后压裂作业各工况阶段燃气发电机组的平均能源利用效率如图 6。

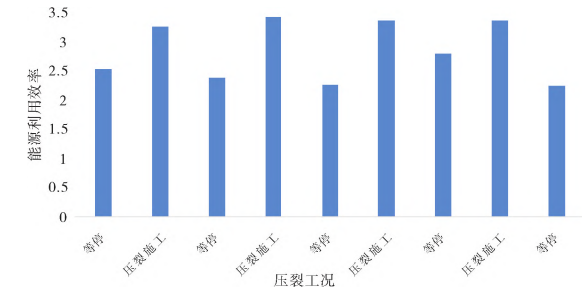


图 6 优化后电驱系统压裂作业各工况阶段燃气发电机组的平均能源利用效率

优化方案下电驱系统等停全过程的综合能源利用效率计算如下:

$$\eta_{mean, idle} = \frac{Q_{pouce, idle1} + Q_{pouce, idle2} + Q_{pouce, idle3} + Q_{pouce, idle4} + Q_{pouce, idle5}}{Q_{gas, idle1} + Q_{gas, idle2} + Q_{gas, idle3} + Q_{gas, idle4} + Q_{gas, idle5}} = \frac{1010 + 941 + 662 + 1245 + 951}{398 + 392 + 290 + 443 + 421} \approx 2.47$$

按照本文工作设定的参考依据计算, 优化方案实施前的电驱系统等停全过程的综合能源利用效率

为 1.86, 优化后综合能源利用效率为 2.47, 提高了 32.8%。

延续记录压裂作业数据 23 天, 燃气发电机组按每日作统计分析的单日综合能源利用效率呈增长趋势, 如图 7 所示。

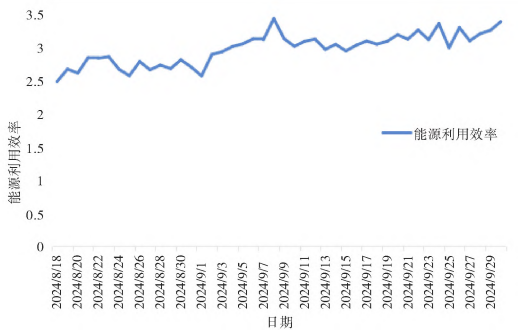


图 7 燃气发电机组优化运行中
单日综合能源利用效率变化趋势

4 结论

通过应用计算机远程控制技术, 实现了燃气机群的远程并行操作, 缩短了燃气内燃机启停操作耗时, 使得缩短空载待机时间成为可能, 压缩了压裂等停阶段燃气机组群的开机数量, 提高了单机带载率, 从而达到节能降耗的目的。依据本文工作设定的参考依据, 压裂等停阶段燃气发电机组的综合能源利用效率提高了 32.8%, 运行优化效果明显, 系统调控能力提升明显。今后, 随着作业配合默契度和调控操作熟练度的提升, 发电机组的低效运行时间还能进一步压缩, 从而进一步提高电驱系统的能源利用效率。

[参考文献]

[1] 邓彪. 进气歧管结构差异对发动机各缸 EGR 率均匀性的影响 [J]. 柴油机设计与制造, 2023, 29 (04): 23-27.

[2] 陈晓利, 陈希叶, 邱朋华等. 添加 H₂ 对 9F 级燃气-蒸汽联合循环机组效率的影响 [J]. 热能动力工程, 2022, 37 (09): 12-21.

[3] 姜伟波, 姜斌, 韩贵阳等. 预燃室点火控制对大功率稀燃天然气发动机性能影响的试验研究 [J]. 内燃机, 2022, 38 (03): 6-10.

[4] 张卫, 段景辉, 张志永. 内燃机活塞环弹力对性能影响的研究 [J]. 内燃机, 2022, 38 (03): 22-27.

- [5] 孙红斌, 郝利华, 曲其磊, 等. 基于燃气发电提质增效目标的天然气钻井平台微电网系统超级电容储能应用 [J]. 内燃机, 2024, 40 (03): 59-64.
- [6] 余金柱. 低渗透油田压裂技术及发展趋势 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43 (21): 175-177.
- [7] 聂安琪, 王团, 黄天怿, 等. 低渗透油田注水开发工艺技术分析 [J]. 石河子科技, 2024 (05): 10-12.
- [8] 艾萌萌. 电驱压裂系统功率匹配及其电动机传热性能研究 [D]. 哈尔滨理工大学, 2024.
- [9] 夏梁志, 刘雄, 丁小宁, 等. 5500HP 新型大功率电驱压裂系统的研制 [J]. 石油和化工设备, 2021, 24 (01): 8-11+15.
- [10] 李双鹏, 杜海波, 刘傲, 等. 2500 型电驱压裂车研制及试验研究 [J]. 机械工程师, 2020 (04): 115-117.
- [11] 武平. 页岩气电驱压裂提速提效实践与认识 [J]. 江汉石油职工大学学报, 2021, 34 (05): 35-37.
- [12] 范永涛, 纪萍, 靖伟, 等. 油田电网非常规负荷供电可靠性的研究 [J]. 上海电气技术, 2022, 15 (02): 38-40.