

引用格式:张烈辉,张安安,陈怡男,等. 钻完井电气化“电代油”技术助力油气行业实现“双碳”目标[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(5): 703-710.

ZHANG Liehui, ZHANG An'an, CHEN Yi'nan, et al. Electricity substitution technology of drilling and completion electrification promote petroleum and gas industry to achieve “carbon peak and neutrality” targets[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(5): 703-710.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.05.001

钻完井电气化“电代油”技术助力油气行业 实现“双碳”目标

张烈辉¹,张安安¹,陈怡男¹,丁宁¹,李海²,曲广龙¹,王涛³,姚少彬³

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;

2. 中国石油西南油气田分公司, 四川 成都 610056; 3. 中国石油昆仑能源有限公司, 四川 成都 610065)

摘要:近年来,国内外对于油气勘探开发的脱碳化技术愈发重视,油气能源行业结构转型是中国实现“双碳”目标的必然途径之一。为油气行业改革加速实现“双碳”目标,以中国石油西南油气田分公司勘探开发“电代油”技术项目为研究对象,通过剖析油气能源技术的改革方向与路径,对比了项目实施前后在环境污染及能源消耗等方面的变化,着重阐述钻完井电气化改造的必要性及优势。分析并总结了项目实践过程中的重难点,提出了制约“电代油”技术发展的关键技术及未来展开相关研究的突破口,为“双碳”目标下“电代油”技术在油气勘探开发中的应用提供了参考。

关键词:钻完井电气化;“电代油”技术;“双碳”目标;智能电站;碳排放

中图分类号:TE13

文献标识码:A

Electricity substitution technology of drilling and completion electrification promote petroleum and gas industry to achieve “carbon peak and neutrality” targets

ZHANG Liehui¹, ZHANG An'an¹, CHEN Yi'nan¹, DING Ning¹, LI Hai², QU Guanglong¹, WANG Tao³, YAO Shaobin³

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610056, China; 3. PetroChina Kunlun Energy Company Limited, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: In recent years, extensive attention has been paid to the decarbonization of petroleum and gas exploration and related technologies at home and broad. The structural transformation of the energy industry of the oil and gas is one of the inevitable ways for China to achieve the “carbon peak and neutrality” targets. Under the prerequisite of energy reform to accelerate the achievement of the targets, the energy reform direction and pathway for the oil and gas technology have been analyzed. Taking the project of the electricity substitution technology in the PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company as an example, the changes in terms of environmental pollution and energy consumption before and after the implementation of the project are compared. Then, it focuses on the necessity of the drilling and completion electrification transformation and the advantages of the drilling and completion are emphasized. Based on the analyses and summary of the key and difficulties in the practice process, the key technologies that restrict the development of electricity substitution technology and the breakthrough points of the future researches are put forward, which provides reference for the application of “electricity substitution” technology in oil and gas exploration and development under the “dual-carbon” targets.

Keywords: drilling and completion electrification; “electricity substitution” technology; “carbon peak and neutrality” targets; smart power substation; carbon emission

收稿日期:2021-12-07。

第一作者简介:张烈辉(1967—),男,博士,教授,本刊第二届编委会委员,现主要从事复杂油气藏渗流理论、试井及数值模拟方向的教学及科研工作。地址:四川省成都市新都区新都大道8号,邮政编码:610500。E-mail:zhangliehui@vip.163.com

通信作者简介:张安安(1977—),男,博士,教授,现主要从事综合能源系统方面的研究工作。地址:四川省成都市新都区新都大道8号,邮政编码:610500。E-mail:2564764@qq.com

基金项目:中央引导地方科技发展专项“电能与LNG一体化输送的复合能源管道交互耦合机理及其多能流协同化理论研究”(2021ZYD0042);西南石油大学自然科学“揭榜挂帅”项目“数据与模型融合驱动的海洋综合能源系统脐带缆状感知关键技术研究”(2021JBGS06)。

2020年9月,中国国家主席习近平在第75届联合国大会上提出“中国力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”的目标。这一举措得到国际社会的高度赞誉和广泛支持。“双碳”目标的确立是中国自2016年签署的气候变化协定——《巴黎协定》后,在全球能源发展中做出的又一重大举措,既肯定了近年来中国在绿色低碳能源发展方面付出的努力,又表明了中国坚决实行能源可持续发展战略的决心,同时彰显了中国积极应对气候变化、推动构建人类命运共同体的大国担当。目前,中国作为碳排量最大的发展中国家,需要在短时间内实现碳排量大幅度下降,必然面临诸多困难与挑战。碳排量、能耗以及经济三者之间的关系是近年来经济学、社会学、工程等相关领域的研究热点之一。各界学者专家指出能源结构调整是中国实现“双碳”目标的必经之路^[1],然而,如何在不造成经济损失,且不影响社会发展的情况下,有效、迅速地减少碳排量,实现从传统化石能源供应体系到清洁能源供应体系的转变,则需要能源战略统筹规划和科学技术创新等方面的逐一突破。

从能源结构层面来看,美国麦肯锡咨询公司(McKinsey & Company)发布的《2021年全球能源展望》(*Global Energy Perspective 2021*)中明确指出,未来全球化石能源需求量将在2027年迎来顶峰,其中煤炭需求峰值在2014年出现随后稳步下降,石油需求预计在2029年达到峰值,天然气需求则会在未来的五到十年内持续增长^[2]。在此背景下,中国石化经济技术研究院针对“双碳”目标做了中国能源发展预测^[3-4],预测结果显示中国能源需求量预测与全球能源需求量预测的变化趋势相吻合,2030年前,石油能源占主导,煤炭能源需求量逐步下降,天然气呈缓慢上升趋势。与麦肯锡报告的不同之处在于该预测表明中国煤炭能源需求量将于2025年达到峰值,且占比逐年降低,而非化石能源,如太阳能、风能等可再生能源需求量将于2030年后大幅度提升,2050年后成为主要供能体系。

全球碳中和路径存在的不确定性与各国碳中和技术发展不均衡有关。中国碳中和路径规划相对明了,2030年前将高度依赖石油能源,同时减少煤炭能源需求量,2030—2040年处于石油能源与可再生能源并立的混合能源体系调整阶段,2040年后可再生能源将成为供能主体。即未来二十年,石油能源作为一次能源对中国实现“双碳”目标至关重要,在石

油勘探开采产业技术中,维持低碳排放则是中国能源结构转型过渡的关键所在。在碳达峰碳中和的目标约束下,油气行业要坚定不移地深入贯彻落实中国国家主席习近平提出的“四个革命、一个合作”能源安全新战略,积极应对油气供需两侧的结构变革,加速转型升级。面对中国石油和天然气对外依存度较高的现状,及必须加快降低煤炭比例的迫切需求,一方面,必须加大对国内石油天然气资源的勘探开采力度,另一方面,必须大力发展低碳节能的开发技术,为实现“双碳”目标提供动能支撑,使中国能源结构调整平稳过渡,最终实现为能源革命提供“压舱石”的重要保障作用。

“电代油”、“气代油”技术作为石油开采过程中降低碳排放的核心技术,可以改善油气设备开采过程中能源消耗高、开采效率低、环境污染大的状况。以西南油气田电改造项目为例,分析了油气井供电系统转型可能出现的问题,总结了近年来电气化技术的发展优势及劣势,并对油气井供电系统的发展前景进行了展望。

1 “双碳”背景下钻机电气化技术发展

在油气开采与生产过程中,需要使用大量的泵类电气设备。现阶段驱动这些设备运转的主要动力来自柴油发动机与柴油电动机。目前中国钻井项目的实施主要采用机械钻机,其动力系统以柴油机为核心动力设备,然而,柴油驱动不仅能耗较高,还会在生产过程中排放大量的 CO_2 ^[5]。为减少碳排量,最直接的途径是引入柴油机尾气处理技术,主要包括废气再循环(EGR)、柴油颗粒过滤器(DPF)以及选择性催化还原(SCR)技术等^[6]。

EGR与SCR技术均可达到欧洲排放标准(欧IV、欧V)。但EGR技术在应用过程中存在明显的缺点:一是废气再燃烧爆发压力高,存在较大的安全隐患;二是对燃料质量要求苛刻,使得EGR技术的应用与推广存在较大的局限性。SCR技术在应用过程中也存在局限性,SCR基础建设需要尿素,而尿素箱装置提高了系统布局的复杂程度;另外,发动机装载防氨气泄漏功能提高了成本,限制了SCR技术的应用^[7]。相较尾气处理这一途径,要减少柴油钻机工作时产生的 CO_2 ,从根本上对钻机柴油驱动的方式进行“零排放”改造更符合油气行业实现“双碳”目标的需求,

即采用电力或天然气代替柴油发电机或柴油机作为驱动钻机的动力源。电力替代柴油发电机以“电代油”或“电改”技术描述,天然气替代柴油发动机则以“气代油”或“气改”技术描述。近年来,大量研究及实践项目表明^[8],钻机动力系统“电气化”技术不仅可以提高开采能效,大幅降低能源消耗强度,同时还能做到有效控制生产环节的化石能源消耗总量,减轻噪音,降低碳排放,环保效果显著。

天然气作为一种环保型能源,在减少碳排放方面具有一定优势。同功率下,采用天然气动力源替代柴油可使CO₂减排大约17%^[9]。“气代油”技术最先在国外展开且应用于实际油田钻井项目中。Endurance Resources III LLC公司在北美油气田德克萨斯州开发项目中,曾将可控硅整流技术应用于燃气发电机钻井系统中以提升功率。怀俄明州天然气钻井项目也曾引入天然气替代柴油,系统设计中还为该天然气发动机配备了额外辅助动力系统^[10]。美国瓦克夏(Waukesha)公司曾在预混合式天然气发动机方面展开研究,然而钻机运行过程中存在动态响应慢和效率低的问题^[11],在钻井动力需求较少时,可采用天然气发动机提供动力,但随着钻井动力需求的提升,需要及时切断燃气机的无功负载以保证发动机负载稳定运行,使得该技术需要具备严格的实时跟踪与监控功能,在实际项目中推广性较差。综上所述,国外大多数以天然气为动力源的钻机研发项目尚处于初级阶段,对于天然气发动机替代柴油发动机的有效性、经济性、环保性方面的评估体系也缺乏统一标准。

中国对于“气代油”技术的支持自“十一五”期间已经展开规划部署。在中国石油天然气集团公司的大力推广与带动下,长庆油气田、渤海油气田等均在“气代油”技术方面的研究与应用颇具成果。2007年6月,中国石油官方发布了2000型天然气、柴油双燃料钻井发动机^[12],该发动机可实现根据不同负载变化调节天然气与柴油动力比例的功能,在可靠性、动力性、排放指标方面均取得成效。2009—2010年,胜利油田胜利动力机械集团有限公司和中国石油集团济柴动力有限公司相继开展了天然气与柴油双燃料钻机研发工作。胜利油田渤海钻井队将两台预混合天然气机投放至钻井项目中,但在实际应用中发现,其可靠性与动力性方面仍然存在不足^[13]。综上所述,“气代油”技术的主要挑战在于单独使用天然气发动机,

动力性能不足,实际应用中,多采用双燃料(柴油)混合模式,需要对双燃料控制系统有所投入,因此,在排放性及经济性方面有所局限;同时,天然气供能受到地域及燃气管道分布的限制,钻井发动机的“气改”仍然需要在多发动机运行控制模式及电控技术方面有所突破。

变频电钻机因其具有操作维护简单、噪声低、无废气排放、故障率低等优点颇受海外油气开发公司的青睐^[14],国外较大规模采用网电钻机主要集中在北美地区。在现阶段,国内电网建设也已经相对完善,自2000年新疆塔里木地区进行柴油钻机电气化改造,2009年后各油田开始大力推广“电代油”技术。中国现役电动钻机占总钻机数20%左右,吐哈油田、青海油田、渤海油田、冀东油田及大庆油田均已进行网电钻井的实践^[15-16]。其中,大庆油田网电钻机占比70%以上,其他油田也相继开展了小规模网电钻井项目并取得一定成果。

中国网电钻机主要包括部分网电驱动和完全网电驱动两种模式。部分网电驱动原理是在系统中增设供电控制系统、耦合器、高压电机及万向轴,而完全网电驱动方式则在整个钻井动力系统中由电网提供全部动力源^[17]。目前国内网电钻井项目主要应用方式为部分网电驱动。中国柴油钻井“电化”运行方案多数是在油区改造或引入高压线路(35 kV或10 kV),利用高压供电房降压后(600 V或690 V)接入钻机VFD房(变频驱动控制房)实现钻机主、辅电机控制中心(MCC)配电房动力供电。若有架设线路过长的钻井则加装动态无功补偿及谐波抑制装置以保证供电质量(图1)。

“电代油”技术的核心在于如何高效地利用电网输电进行驱动,即网电驱动技术。采取全电改造或部分网电驱动的电改方案时,需要结合当地油区及电网的实际情况,为钻机的不同工作模式设计控制策略。近年来,电驱技术的研究热点集中在基于钻

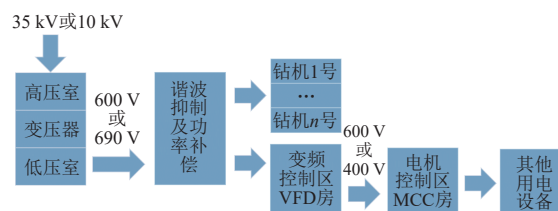


图1 典型“电代油”电改方案布局

Fig. 1 Typical “electricity substitution” solution layout

井现场的基本情况增设智能电站,利用智能电站向电机输送稳定充足的电能,但不同于图1中的电改方案。它集成了功率调节模块、滤波补偿单元、交流控制单元及故障监测模块等^[18]。智能电站与VFD及MCC协同工作,能够规避配电及电控设备中的谐波影响,同时满足电网侧负荷设定的技术标准。然而,智能电站造价昂贵,钻井设备电气负荷大且连续变化,高、低压电动装置的频繁启动与切换会对系统造成冲击,因此,对系统电气设备安全性能要求较高。钻井现场当地电网与发动机能源输出之间很难装配互锁装置,若该地区电网因故障无法供电,将造成一定的经济损失。

电气化的最终目标是在石油开采过程中实现零碳排放,因此,实行“电代油”技术还需要从减排性能出发,对油气钻井电改方案的节能、减排效果进行量化,但中国在“电代油”技术上仍然缺乏统一合理的量化标准及测试方法^[19-21]。随着“双碳”目标的逐渐推进,节能减碳的实际效用需要对“电代油”或“气代油”项目实施的全生命周期进行评估。全生命周期应当涵盖从项目启动开始的能源投入到运转后产生的CO₂及其他污染物排放量的计算^[22]。实行改造时,应包括改造过程中电力或燃气接入的碳成本及能量损失的折算,例如电改项目碳排放量的量化,除了要对电改前柴油机燃料燃烧碳排放量进行评价,也不可忽略电改后接入电网的碳强度这一关键因素。对于电改项目电网碳强度的衡量,要将发电侧的能耗或碳排放量,及输电侧线路设备中电能损耗折算成碳排放量一并计入在内。目前单就电网碳强度而言,碳排放量的评估及其研究体系相对完整,然而,中国钻完井电改项目及气改项目的减碳评估在电网侧的估算这一方面仍然缺乏完整性^[23-24]。其主要原因在于钻井本身的碳计算内容过于复杂,行业内没有统一的简化标准,并且难以将电网侧的碳排放量计算融入其中,使得整个计算体系过于庞大。

清洁能源替代化石能源成为主要电力供能体系是实现“双碳”目标的最终解决方案,“电代油”技术的实行与推广则是短—中期石油能源行业打造零碳排放体系的基石。与此同时,还应加快电驱压裂、天然气管网压力能发电等低碳技术的研发,全面提升能源利用效率及经济性,实现能效就地利用。同时提高清洁电力的使用比例,推广应用太阳能、风能、潮汐能等可再生能源,提高油气产量的同时达到节

能减排的目的。另外,在油气开采与生产过程中,还需完善油气勘探开发全生命周期的能效监测及核算机制,加强碳排放监测系统建设,利用数字化技术提高传统油气勘探开发的安全水平和效率,进一步提升减碳效果。

2 “电代油”技术助力碳中和目标实现

2.1 “电代油”技术

2020年,中国油气企业不断提升陆上油气勘探开发力度,增储上产捷报频传,在油气领域取得了一定突破。其中,中国石油西南油气田探明两个万亿立方米气田,全面建成300×10⁸ m³大气区,占四川盆地2020年天然气总产量的56%。在国家“双碳”目标背景下,中国石油西南油气田分公司于2020年开展了油气田开采大规模“电代油”改造项目,旨在构建绿色产业结构和低碳能源供应体系,助力油气行业加快低碳转型和提质增效。

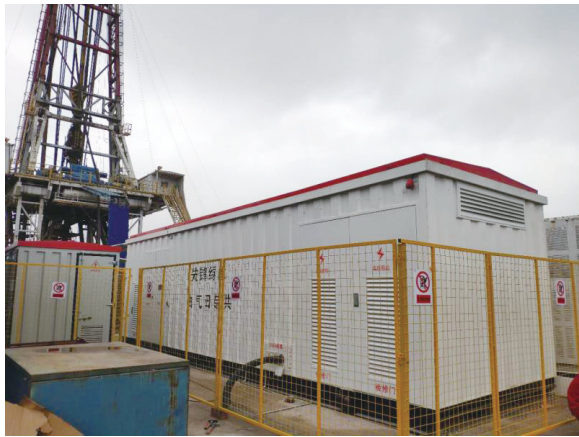
中国石油西南油气田分公司“电代油”项目共建设终端撬装式变电站、相关变配电设施、传动系统、控制系统、辅助系统、VFD房和MCC房86套。改造前采用柴油发电机提供电能,通过VFD房变频器控制单元和干式变压器,驱动绞车电机、转盘电机、钻井泵电机,提供MCC房及井场用电。改造后,撤掉柴油发电机组,由电网提供电能。该项目电改方案实施中采用了中国石油西南油气田分公司研发的油气田专用智能撬装式变电站(图2)及电能替代专用撬装式控制设备,提供“撬装式变电站+智能物联网关+业务应用平台”整体解决方案,解决油气勘探智能用电问题。

中国石油西南油气田分公司“电代油”改造项目中开发的专用智能撬装式变电站的特点是设计紧凑,占地面积小,便于安装与迁移。该智能电站主要由高/低压柜、交流变频柜、PLC(可编程逻辑控制器)控制柜等设备组成。为提高钻机效率及控制输出的平稳性,电改系统集成变配电、谐波治理、无功补偿与远程监控等多项功能为一体,为油气田开采工作提供了可靠的电能,同时可保障上游电网的安全稳定运行。

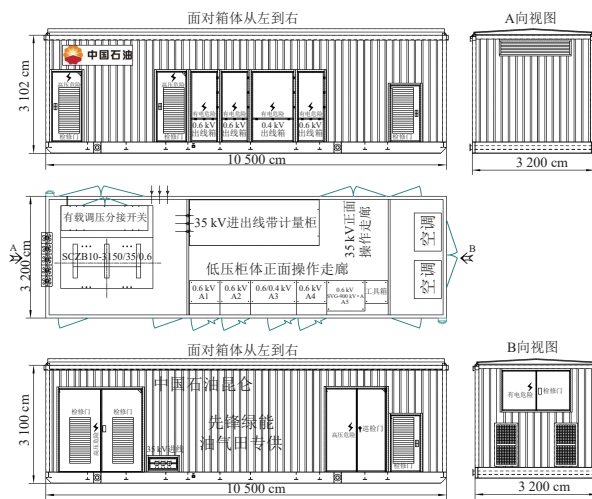
项目实施前,由于油气井多在偏僻的高山地段,且电网及配套设施不发达等原因,仅可采用易运输和储存的柴油作为燃料,由柴油发电机作为动力源发电提供动力,其能源利用效率低、噪音扰民、污染严重。为契合国家“双碳”战略,对电改方案实施前

后的环境、社会影响及生产效率进行对比(表1)。

“电代油”技术在减排降噪方面效果显著。油气开采过程中,采用清洁电网电替代柴油可实现钻井全天候作业,实施电改后,日均压裂段数由2段增加至4



a. 油气田专用智能撬装式变电站外观



b. 油气田专用智能撬装式变电站设计图

图2 油气田电能替代专用智能撬装式变电站

Fig. 2 Special intelligent skid-mounted substation and control equipment for electric energy substitution of oil and gas fields

段。采用电驱压裂撬替代柴驱压裂车,单井可节省柴油410 t。实施电改前,油气开采中,单井钻井及压裂平均消耗柴油950 t,折算标煤1 384 t(柴油标煤折算系数取1.457 1),单井钻井压裂周期约4个月,单井能耗相当于一台2.4蒸吨(蒸汽锅炉每小时产生的蒸汽量,1 t/h=0.725 MW)燃煤锅炉,且电改方案实施后无任何污染物排放,噪声污染由120 dB降低至60 dB。

通过碳交易算法^[25-26]计算电改造后的污染物排放情况(表2):①根据实际替代电量,按照欧洲减排量核算法(UER),核算CO₂排放量,并推算其他污染物排放量;②根据计算的CO₂排放量,按照标煤燃烧污染物排放基础数据,推算标煤数据(1 t标煤燃烧排放2.6 t的CO₂);③根据用电量和齐柴G8V190型柴油机能耗参数及损耗计算出油发电量为0.36×10⁴ (kW·h)/t,推算替代柴油量。

截至2021年6月底,研究项目累计替代柴油172 375 t,同比折算减少标煤燃烧83 536 t,降低CO₂排放217 193 t,降低氮氧化物及SO₂排放2 590 t。以每平方米树林平均减排2 kg的CO₂折算,相当于植树约109 km²,环保效果显著,产生了良好的环境和社会效益。

“电代油”技术的优势还体现在大幅度提升生产效率并降低能耗。电力消耗方面,根据研究报告中发布的各区域用电统计数据^[27],电驱钻井单井平均用电量约为200×10⁴ kW·h,电驱压裂单井平均用电量约150×10⁴ kW·h。与传统柴油机驱动钻井、压裂施工相比,电驱钻井能耗可降低35.46%,电驱压裂能耗降低38.78%。经济效益评估方面,采用电驱压裂车队可减少超过60%的人员配置,大量降低人工成本。以人员费用标准每年15×10⁴元/人,柴驱机组配备50人,电驱机组配备30人计算,“电代油”技术可至少节省人工费用40%。且柴油机组的运维成

表1 项目实施前后各项效益指标对比情况

Table 1 Comparison of various benefit indicators before and after implementation of electricity substitution project

实施阶段	环境、社会影响	生产效率	
		电力公司	油气田公司
项目实施前	存在废气排放,噪音大(120 dB左右),周边居民投诉阻工	无增量电量销售	①钻井无法全天候施工,日均压裂2段,无法保障页岩气快速大规模生产; ②阻工现象频繁
项目实施后	降低碳排放,噪音小(60 dB左右),企地关系和谐	①无需投资末端电网,便可完善地方电网结构; ②无需承担线损,“十四五”增量电量预计达45.5×10 ⁸ kW·h	①钻井24 h全天候作业,日均压裂4段,页岩气开发效率大幅提升; ②促进地方和企业和谐发展

本及设备消耗较大。以合金钢泵头平均寿命 $300\text{ h}^{[28]}$, 泵头成本 30×10^4 元/个,作业30段后更换润滑油、液压元件及过滤器等消耗件计算,电改前该柴油驱动机组的年度维保费用大约是电驱机组年度维保费用的8倍以上。

“电代油”技术对实现“双碳”目标的助力还体现在提升电力消纳方面。四川能源结构以水电为主。据2019年统计数据,四川省水力发电装机量占装机总量的70%以上,水电外输是四川省提高清洁能源利用率至关重要的举措。然而,丰水期,即每年6月至10月,普遍存在水电量大但外输电路不足的现象,严重影响水电外输效率。2018—2020年四川地区丰水期调峰弃水发电量分别为 122×10^8 , 92×10^8 , $76\times 10^8\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。西南油气田“电代油”项目截至2021年6月耗电统计数据显示,单井全电驱油气开采耗电

量达 $350\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$,用电量极大且均为增量用电,累计消纳清洁水电超过 $6.2\times 10^8\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。由此可见,全面实施“电代油”技术可消耗四川富余水电,促进省内能源消纳,能有效地缓解丰水期由于外输电路不足而引起的弃水问题。

2.2 “电代油”技术难点解析

虽然“电代油”技术能为油气能源行业带来巨大的社会及经济效益,为“双碳”目标的实现助力显著,但仍存在诸多技术难题,限制“电代油”项目的实施与推广。

目前,“电代油”技术难点主要有以下几点,其中,针对谐波治理以及电能质量波动抑制的常用解决方案,主要分析了典型电动钻机交流变频驱动电气控制(图3)。

表2 碳交易算法统计污染物排放情况

Table 2 Pollutant emissions statistics obtained by carbon trading algorithm

统计对象	售电量 ($10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$)	CO ₂ 减排量 (t)	SO ₂ 减排量 (t)	氮氧化物减排量 (t)	替代柴油量 (t)	标煤减少量 (t)
单井全电驱	350	1 225	11	3	972	471
项目累计	62 055	217 193	2 005	585	172 375	83 536
“十四五”期间累计	455 000	1 592 500	14 700	4 288	1 263 889	612 500

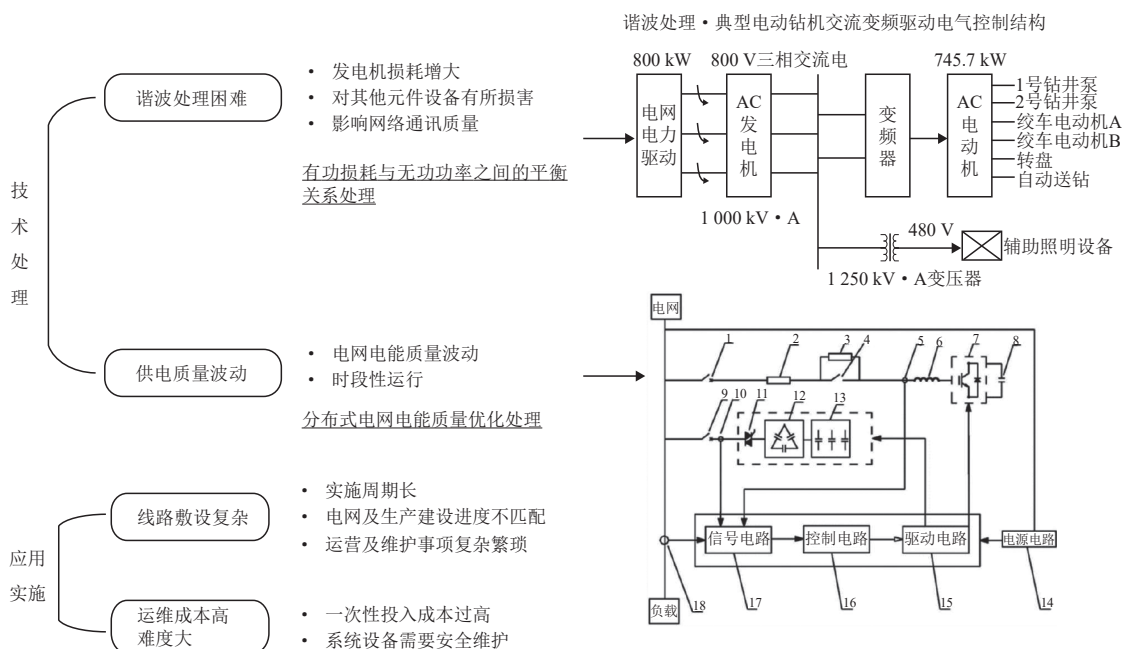


图3 “电代油”技术难点解析

Fig. 3 Analysis of the difficulties of “electricity substitution” technical pathway

1) 谐波治理

谐波治理一直以来是电改方案中难以攻克的技术难题。由于钻机在运行过程中负载变化幅度较大,容易产生谐波,使电网电压、电流波形产生畸变,大量谐波使电能传输和利用效率降低,致使电气设备过热、产生震动和噪音,并使绝缘老化、使用寿命降低,谐波还会引起继电保护和自动装置误动作,使电能计量出现混乱。对于电力系统外部,谐波对通信设备会产生严重干扰。

2) 成本增加

变、配电设备虽然可以多次重复使用,但其一次性投资较大,需要有足够的资金投入,且钻井设备电、气负荷较重,负载变化频繁,采用高压电动化设备直接启动对供电系统有一定的冲击,安装软启动设备需增加投资,采用低压电动化设备电流大,设备故障率高,必须权衡利弊。

3) 供电质量波动

由于电网供电质量受负荷变化的影响发生波动,钻井工作现场的部分变频设备等保护启动无法正常运行,只能时段性地改为柴油发电机供电。供电质量的波动是制约网电钻机应用的主要影响因素。

4) 设备安全性需求

考虑电气设备运行安全,发电机电力输出与电网没有采用互锁装置。在电网停电或发生故障无法供电时,只能人工进行供电电缆的拆接,既不安全,又延长了停机时间。

5) 线路敷设流程复杂、运维成本高

电力线路建设在审批和实施阶段,流程繁琐,涉及面广,办理周期长。以30 km、35 kV的线路为例,标准建设周期达400 d,电网建设和生产建设进度不匹配。在投产运营和维护阶段,涉及电费结算、电力调度、供电设施维护等事项,需要大量人力和财力投入。另外,各油气田在实施过程中,需要探索适合各自情况的供电模式和实施办法。

3 结论

电气化是传统工业节能增效的重要手段,也是油气开发关键技术变革、整体效能提升和减少CO₂排放的重要途径。随着中国“电代油”技术的快速发展,可再生能源发电技术及其经济性不断提升,油气行业“电代油”的推广应用前景越发清晰。但相对于

站场地面设施“电代油”技术的研究与应用,近几年对于油气井供电系统的研究还比较匮乏。如何在西部戈壁、西南山区以及海上油气田中耦合可再生能源发电,打造低碳绿色开发示范油气田,也是发展和推广“电代油”技术的研究重点。电气化技术在油气行业的大力发展不仅要依靠实现“双碳”目标这一强大动力,研发油气井先进供电系统、提高系统效能与可靠性、大胆探索创新电力保障模式、统一部署区域电网建设更是“电代油”技术应用在油气田的必然需求。

参考文献

- [1] 杨宇,于宏源,鲁刚,等.世界能源百年变局与国家能源安全[J].自然资源学报,2021,35(11):2803-2820.
YANG Yu, YU Hongyuan, LU Gang, et al. Interview on the unprecedented changes of energy geopolitics and national energy security[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(11): 2803-2820.
- [2] McKinsey & Company. Global energy perspective 2021[R/OL]. (2021-01-12)[2021-12-07]. <https://ishare.iask.sina.com.cn//12D4cjF30f0v.html>.
- [3] 罗佐县.碳中和激活多领域天然气需求潜力[J].能源,2020,142(11):30-32.
LUO Zuoxian. Neutralization potential of natural gas demand[J]. Energy, 2020, 142(11): 30-32
- [4] 肖潇,肖溢.中国的海外能源战略差异化研究——以中东和东盟LNG进口为例[J].科技经济市场,2016,21(5):194-197.
XIAO Xiao, XIAO Yi. China's overseas energy strategy: Taking LNG imports from the Middle East and ASEAN as examples[J]. KEJI JINGJI SHICHANG, 2016, 21(5): 194-197.
- [5] 帅石金,唐韬,赵彦光,等.柴油车排放法规及后处理技术的现状与展望[J].汽车安全与节能学报,2012,3(3):200-217.
SHUAI Shijin, TANG Tao, ZHAO Yanguang, et al. State of the art and outlook of diesel emission regulations and aftertreatment technologies[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2012, 3(3): 200-217.
- [6] 权春锋.柴油机尾气处理技术发展分析[J].汽车实用技术,2020,24(8):82-84.
QUAN Chunfeng. Development analysis of diesel engine exhaust treatment technology[J]. Automobile Applied Technology, 2020, 24(8): 82-84.
- [7] KELLENS K, DEWULF W, OVERCASH M, et al. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI) —CO₂PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 17(1): 69-78.
- [8] 韩勇,任艳辉,张悦,等.石油钻井机械“电代油”配套技术研究[J].中国设备工程,2020,(4):190-192.
HAN Yong, REN Yanhui, ZHANG Yue, et al. Researching on electric drilling machinery technology[J]. China Plant Engineering, 2020, 36(4): 190-192.
- [9] PAPAGIANNAKIS R, KRISHNAN S, RAKOPOULOS D, et al.

- A combined experimental and theoretical study of diesel fuel injection timing and gaseous fuel/diesel mass ratio effects on the performance and emissions of natural gas-diesel HDDI engine operating at various loads[J]. *Fuel*, 2017, 202: 675-687.
- [10] GIACHINO A. PRIVATE EQUITY ENERGY BETS BURN INVESTORS[R/OL]. (2021-04-22) [2021-12-07]. https://pestakeholder.org/wp-content/uploads/2021/04/PESP_Report_PrivateEnergy_March2021-v4-2.pdf
- [11] JOHNSON D, HELTZEL R, NIX A. Trends in unconventional well development—methane emissions associated with the use of dual fuel and dedicated natural gas engines[J]. *Energy Technology*, 2015, 2(12): 988-995.
- [12] 张东科,李树生,蔚富海,等. 双燃料发动机的研制开发及其应用[C]//中国内燃机学术年会暨测试技术分会、油品与清洁燃料分会和吉林省内燃机学会联合学术年会,2012. ZHANG Dongke, LI Shusheng, WEI Fuhai, et al. Development and application of dual fuel engine[C]// Chinese Society Internal Combustion Engine Academic & testing technology annual conference, Oil products and clean fuels & Jilin internal combustion engine society joint academic annual meeting, 2012.
- [13] 王京龙. 气体钻井安全监控系统在胜利油田的应用[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2011, 4(6): 213. WANG Jinglong. Application of gas drilling safety monitoring system in Shengli Oilfield[J]. *Management & Technology of SME*, 2011, 4(6): 213.
- [14] HUNTINGTON H G, BHARGAVA A, DANIELS D, et al. Key findings from the core North American scenarios in the EMF34 intermodel comparison[J]. *Energy Policy*, 2020, 144: 111599.
- [15] 蒋合艳,陆俊康,武卫卫,等. 电驱动钻机气控系统的优化设计[J]. 液压气动与密封, 2019, 39(11): 35-39. JIANG Heyan, LU Junkang, WU Weiwei, et al. Optimization design of pneumatic control system of electric drive drilling rig [J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2019, 39(11): 35-39.
- [16] 刘志强,宋朝阳,程守业,等. 我国反井钻机钻井技术与装备发展历程及现状[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 32-65. LIU Zhiqiang, SONG Zhaoyang, CHEN Shouye, et al. Development history and status quo of raise boring technologies and equipment in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 32-65.
- [17] 王代华,万小宏,李国孝,等. 电驱动钻机控制系统配置方案探讨[J]. 石油机械, 2001, 29(9): 53-56. WANG Daihua, WAN Xiaohong, LI Guoxiao, et al. Discussion on configuration scheme of electric drive drilling rig control system[J]. *China Petroleum Machinery*, 2001, 29(9): 53-56.
- [18] 张健,周霞,刘旭,等. 机械钻机电代油节能减排效果测试方法研究[J]. 钻采工艺, 2020, 43(5): 82-83. ZHANG Jian, ZHOU Xia, LIU Xu, et al. Research on energy-saving and emission reduction effect test of replacing oil by electricity in machinery drilling rig[J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43(5): 82-83.
- [19] 王彤,李丹,李春秋. 油田钻机驱动“以电代油”的应用及效益[J]. 电力需求侧管理, 2014, 16(5): 37-38. WANG Tong, LI Dan, LI Chunqiu. Application and benefit of "replacing oil with electricity" in oilfield drilling rig drive[J]. *Power Demand Side Management*, 2014, 16(5): 37-38.
- [20] 邢洁,宋男哲,李婉婷,等. 基于STIRPAT模型的黑龙省“十四五”期间碳强度目标研究[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(8): 77-81. XING Jie, SONG Nanzhe, LI Wanting, et al. Study on the carbon intensity reduction target in Heilongjiang Province during the 14th Five-Year Plan Period based on STIRPAT model[J]. *Environmental Science and Management*, 2021, 46(8): 77-81.
- [21] 朱发根,单葆国,马丁,等. 基于CO₂减排目标的2050年全球能源需求展望[J]. 中国电力, 2016, 49(3): 34-38. ZHU Fagen, SHAN Baoguo, MA Ding, et al. Global energy demand prospect based on CO₂ emission reduction target in 2050[J]. *Electric Power*, 2016, 49(3): 34-38.
- [22] 翁琳,陈剑波. 光伏系统基于全生命周期碳排放量计算的环境与经济效益分析[J]. 上海理工大学学报, 2017, 39(3): 282-288. WENG Lin, CHEN Jianbo. Environment and economic analysis on carbon dioxide emissions calculation in the life cycle of a photovoltaic system[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2017, 39(3): 282-288.
- [23] 贺甲元,程洪,向红,等. 塔河油田碳酸盐岩储层暂堵转向压裂排量优化[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(2): 233-238. HE Jiayuan, CHENG Hong, XIANG Hong, et al. Optimizing the displacement of temporary plugging and diversion fracturing of the carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(2): 233-238.
- [24] 孙惠娟,蒙锦辉,彭春华. 风-光-水-碳捕集多区域虚拟电厂协调优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4040-4049. SUN Huijuan, MENG Jinhui, PENG Chunhua. Coordinated optimization scheduling of multi-region virtual power plant with wind-power-photovoltaic-hydropower-carbon capture units[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 4040-4049.
- [25] ZHANG N, HU Z, DAI D, et al. Unit commitment model in smart grid environment considering carbon emissions trading[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 7(1): 420-427.
- [26] 郭尊,李庚银,周明. 计及碳交易机制的电-气联合系统快速动态鲁棒优化运行[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1220-1228. GUO Zun, LI Gengyin, ZHOU Ming. Fast and dynamic robust optimization of integrated electricity-gas system operation with carbon trading[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(4): 1220-1228.
- [27] 张斌,李磊,邱勇潮,等. 电驱压裂设备在页岩气储层改造中的应用[J]. 天然气工业, 2020, 40(5): 50-57. ZHANG Bin, LI Lei, QIU Yongchao, et al. Application of electric drive fracturing equipment in shale gas reservoir stimulation[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(5): 50-57.
- [28] 童征,展恩强,刘颖,等. 国内电驱压裂经济性和制约因素分析[J]. 国际石油经济, 2020, 28(7): 53-62. TONG Zheng, ZHAN Enqiang, LIU Ying, et al. Analysis of economy and constraints of electric-powered fracturing application in China[J]. *International Petroleum Economics*, 2020, 28(7): 53-62.

(编辑 余聪)