

页岩油（气）井电驱压裂短时大功率负荷供电技术研究与实践

荆波 邹兵

（中国石化胜利油田分公司 山东东营 257001）

摘要 随着能源终端消费领域的革命，工业用能结构由化石向电能转变，油田油气开发领域的钻井和压裂等用能大户，大约60000 马力，注入压裂液量 8.5 万 m³，以往因设备制造和电网供电能力等因素的限制，一直采用柴油机作为动力，造成生产成本高、单耗高、污染大和噪音大，碳排放高。随着国家“双碳目标”的实施，在油气等重点行业拓宽电能替代范围，加大清洁能源推广应用，加快柴油等燃料清洁替代，广泛推广电钻机、电压驱、电压裂、电加热等技术，向电气化、低碳化、智能化转型升级，提高油气等领域电气化水平。在实际应用中，电驱压裂应用场景不同于常规用电负荷，具有负荷大（40MW）、时间短（15D）、电源配套接入要求高等限制，在实际应用中存在一些问题和困难，通过技术研究和设备厂家结合，提出一种预装式、可重复利用、一体化的技术方案，该方案可以减少投资、缩短电源建设时间，减少运行成本，在现场进行实际应用，取得良好经济效果，有较好的推广价值。

关键词：预装变电站 电动化 页岩油 压裂

0 引言

近年来，随着油田加大勘探开发力度和设备制造水平的提升，油气生产开发应用了大量的新理论、新技术、新工艺、新设备，其中，页岩油作为油气资源新的主要阵地，提高原油产量的加大开发力度，[1]压裂施工工艺是页岩油开发的一个重要工艺。压裂是指采油或采气过程中，利用水力作用，使油气层形成裂缝的一种方法，又称水力压裂。[2]油气层压裂工艺过程用压裂车，把高压大排量具有一定粘度的液体挤入油层，当把油层压出许多裂缝后，加入支撑剂(如石英砂等)充填进裂缝，提高油气层的渗透能力，以增加注水量(注水井)或产油量(油井)。[3]。常规井压裂一般采用分段式压裂，具有压力高、排量大的特点，[3]有的压裂 1 口井 33 段，设计最大排量 20m³/min，最高压力为 95MPa，设计加砂、CO₂、压裂液量共计 8.5 万 m³。以往，因生产管理流程、设备制造和电网供电能力等因素的限制，一直采用柴油机作为动力，压裂中需要耗费大量的柴油，每方注入液单耗大，并且尾气排放和噪声污染严重。近年来，国家积极开展绿色低碳建设，油田积极开展优化用能结构，实施电能替代措施，增加钻井及压裂设备采用电驱终端用电设备，提升电动化水平达到 50%。提高终端设备用电比例，与燃油相比，电力更多可来源于可再生能源为此，以达到降低噪音、降本增效的目的，用能结构调整。

网电钻机、网电压裂是目前页岩油开发的一项主要环节，页岩油开发首先为网电钻机，施工时间为 10 个月左右。钻井完成后，再进行压裂，施工时间为 2 个月左右。且具有工艺负荷尖峰高、持续运行时间短等特点。[3]。

目前工区的用电负荷类型主要分为钻井、压裂、采气三大类。其中采气平台均安装了箱式变电站（以下简称箱变）

1 电驱供电方案

1.1 电气负荷计算

页岩油开发的工艺流程为先钻井，钻井结束后压裂，以往是使用油驱的钻机和压裂车组。网电钻机、电驱压裂设备各有相应的整套设备，负荷各不相同，分别进行负荷统计计算。

1.1.1 网电钻机：

目前，网电钻机油田得到了广泛的应用，网电钻机按照完井深度一般分为 30 型、40 型、50 型、70 型四种类型，不同的完井的井深现所需要的功率不同，网电钻机情况详见表 1。

表 1 网电钻机情况统计表

序号	钻机型号	装机总容量（kW）	运行最大功率（kW）
1	ZJ30	2380	1100
2	ZJ40	2800	1300
3	ZJ50	3920	1800
4	ZJ70	5100	2500

以 70 钻机为例：
 钻井运行最大负荷， 3150kW， 10kV， 负荷等级为三级。自带变频柜启动，
 有时候，为了提高钻井进度，两台或者多台网电钻机在一个区域同时施工。计算负荷
 $N \times 3150kW = ****kW$ ， 计算负荷见表 2

表 2 钻井负荷计算表

序号	负荷名称	设备数量	运行台数	单台设备功率 (kW)	需要系数	计 算 负 荷 (kW)	负 荷 等 级
1	网电钻机	1	1	3150	1	3150	三级
2	网电钻机	2	2	3150	1	6300	三级
3	网电钻机	3	3	3150	1	9450	三级

钻井一般需要运行时间约 184 天。

1.1.2 压裂

压裂设备主要包括压裂泵、混砂泵以及其他生产辅助负荷，其中压裂泵是最大负荷。
 压裂撬负荷主压功率（经验计算公式）=压力×排量×16.67÷ $\eta_{\text{泵}}$ ÷ $\eta_{\text{电机}}$ ÷ $\eta_{\text{变频}}$ ÷ $\eta_{\text{变压}}$ ，各部件效率按 $\eta_{\text{泵}}=0.92$ ， $\eta_{\text{电机}}=0.947$ ， $\eta_{\text{变频}}=0.98$ ， $\eta_{\text{变压}}=0.99$ ；
 压裂排量一般为 14-18m3/min，页岩油井压裂增大至 20m3/min。压力一般为 60-90MPa，页岩油井压裂有至 110MPa，负荷 12000kW 至 36000kW，甚至有可能达到 40000kW。具体计算见表 3.

表 3 压裂泵负荷计算表

不同压力下（18-20m3/min）全电压裂实际施工需要的电网功率容量计算

序号	压力（MPa）	排 量 （m3/min）	主 压 功 率 （kW）	全电动功率 （kW）	所需电网容 量（kVA）	建议电网容 量（kVA）
4	90	18	31949	33949	39021	42415
5	95	18	33723	35723	41061	44632
泵送	70	2	2761	2761	3174	3174
泵 注 CO2	70	3	4141	4141	4760	4760
合计						50348-52560

备注：全电动功率=主压功率+辅助功率，依据现有施工统计，辅助功率取 2000kW；所需电网容量=全电动功率÷功率因素，功率因数按 0.87 计；建议电网容量（取整）=所需电网容量÷0.92，电网容量富余用于应对短时间压力异常上升。
 需 12 台压裂设备车组同时压裂，供电负荷 35000kW。压裂总设备功率约 42.6MW，自带变频柜启动，负荷等级为三级。
 压裂负荷：总负荷约为 35000kW，压裂设备采用变频启动。其中 10kV 负荷 34600kW，低压负荷 400kW。运行时间约 45 天。
 项目同期最大负荷：35000kW。负荷计算见表 5.1-1。计算负荷小计 35000kW，项目同期最大负荷 35000kW

表 4 压裂负荷

序 号	负荷名称	设备数量	运 行 台 数	单台设备功率 (kW)	需要系数	计算负荷(kW)	负荷等级
一	10kV 负荷						
1	压裂撬	12	12	4042.5	0.65	31500	三级
2	电动混砂撬	1	1	600	1	600	三级
3	其他负荷	1	1	2500	1	2500	三级
二	380V 负荷						
1	自控等其他	/	/	400	1	400	三级

可以看出：压裂的用电负荷远大于网电钻机，因此以压裂负荷选取， 35kV 撬装简易变，主变容量 2×25MVA，两台主变同时运行，单台主变最大负荷约 17500kW。根据新建开发井组位置，直线距离 10km 范围内较近的油网变电站。

26)

编号	负荷名称		运行时间 天	运台数	单台设备功率 (kW)	计算负荷(kW)	负荷性质
1	钻井负荷		300	4	4000	16000	连续
2	压裂负荷	主压设备	60 天	12	3675	33723	连续
		辅助负荷		1	3675	2000	连续
		泵送桥塞		1	3675	2761	连续
		泵注 CO2		2	3675	4141	连续
压裂负荷 42625kW (95MPa 18m3)							

2 一体化预装站

压裂装置在完成一个井场的压裂工作后，要转换至新的井场，为减少建设投资，降低运行成本，可以重复利用，经研讨论证，提出移动式智能模块化变电站方案，线路采用运用新型复合材料电杆，其中变电站主变容量可以根据用电负荷选择 20000-31500kVA 的，线路根据周边电网结构选择 110kV 或者 35kV。设备和设施都选择可重复利用。

该方案集成多项新技术优化，预装式智能变电站是集合了 GIS 组合电器、变压器、10kV 开关柜、二次设备等产品。一次、二次系统设备在工厂内安装调试好，装入一个可移动、密封、防潮、防锈的三层预制舱体内，实现“系统集成化、生产工厂化、装配模块化、施工简单化”的“四化”电站建设，使系统达到“深度预制+低碳环保+智能管理”，是一种创新的“多维度电力解决方案”快速配送式建站模式，有效解决压裂这种短期大功率负荷需求，负荷转移。未来，将打通电力运维平台与压裂操控平台的数据互联互通和操控协同管理，建设油电一体化管控平台。

2.1 变电站

按照最大工况配置撬装变。

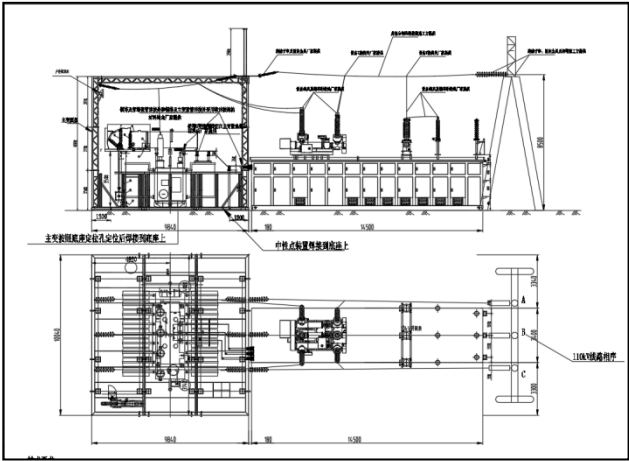
设计 110/10kV 的变电站，主变 40000kVA。

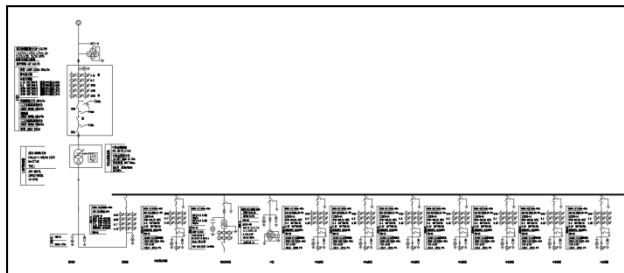
考虑 8 回出线柜：12 个压裂泵用 4 个出线柜，4 套网电钻机 2 个出线柜，站用变 1 个出线柜，备用 1 个出线柜。

110kV 撬装变电站（25mX10m）具体见图一

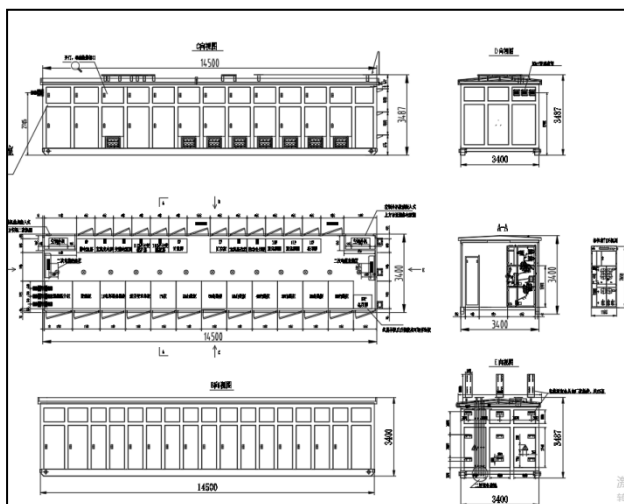
电力电缆截面选择原则

变电所出线电缆采用铝芯电缆配置，在投资、施工、耐腐蚀、供电可靠性要求等方面均能满足要求，考虑运行经验和控制线路投资成本，电缆线路采用铝芯电力电缆。结合该区域和环境保护要求，按负荷电流选择、短路热稳定、电压损失校验和敷设环境等技术条件几方面选择。电缆型号：YJLV22-26/35kV 3×300mm2，电缆载流量 382A，满足变电站负荷电流要求。





图一



图二

2.2 电源线路

1.2 杆型及导线选择

1.2.1 线路杆型

依托中石化重点科研课题研制成功的全绝缘复合杆塔系列产品，自主创新设计了杆型结构和构架组装方式，能够满足施工快捷，安装方便，可多次重复利用，是中石化上下游原材料“（碳）玻璃纤维+聚氨酯树脂”加工制造的复合绝缘杆塔新产品在国内首次小规模应用于 110kV 输电线路。

1.2.2 导线及电缆

1) 导线截面选择原则

结合区域安全运行和环境保护要求，按负荷电流经济密度选择。

导线型号：钢芯铝绞线 JL/G1A—185/30，载流量 453A。

避雷线型号：钢绞线 GJ—50，OPGW 光缆

导线截面采用 LGJ-185，带钻井及压驱负荷（35000kW），单条 LGJ-185 线路需带负荷 17500kW，电流 320A。通过计算，采用 35kV 线路供电，在供电负荷末端的电压损失值达到 $5.7\% < 10\%$ ，可以满足压降要求。

末端电压损失计算：最末端（线路最长距离为 10km）电压损失值：5.7%。

电压损失数据：架空线路为 $0.034\%/MW.km \times 17.5MW \times 9.6km = 5.7\%$ ；（工业与民用配电设计手册 表 9-71 P548）

2)

1.2.3 架空线路绝缘配合

本线路全线按 IV 级污秽区配置绝缘，架空线路绝缘采用 FXBW-35/100 型硅胶合成绝缘子；其中承力塔耐张绝缘子串采用双联，直线塔悬垂绝缘子串采用单联，直线跨越悬垂绝缘子串采用双联；FXBW-35/100 型硅橡胶合成绝缘子单位泄漏距离为 39.1mm/kV；

本线路架设 1 根避雷线，1 根 OPGW 光缆，作为对线路的防雷保护措施，避雷线（光缆）对边导线的保护角采用 $20^\circ \sim 30^\circ$ 。

1.2.4 接地与铜铝电缆连接

架空线路杆（塔）全线采用避雷线进行防雷接地。接地电阻不大于 10Ω ；接地装置型式：每基杆（塔）均需接地，杆（塔）接地装置采用沿基础四周埋设环型接地体，并与杆（塔）主材相连接。

电缆线路连接采用防水型的冷缩中间接头连接，外皮实施接地，以保障人身和线路运行安全。

接地极均采用热镀锌接地极，接地线采用热镀锌扁钢。

3 电驱压裂一体化方案实践

110kV/10kV 大功率直供电驱动压裂机组装置,供电质量稳定,能够承受大电机扰动,使无级调速运行更加平稳。可以优化减少柴油机驱动需要配置的大量变频装置,并可将泵组高压系统、变频矢量控制、逻辑控制器、远程操控一体化设计,实现电动压裂泵的智能化控制。

2022 年 3 月 28 日,胜利油田页岩油产能建设重点项目--义 193-X28 井电驱压裂开发井组配套输变电 110kV31500kVA 工程一次送电成功,时全国电压等级最高、变电容量最大的供电装置的页岩油电源。为樊页平 1、牛斜 55 井组页岩油区块的电驱压裂做了充足的技术储备,

在施工中,充分借鉴前期义 193-X28 井和牛庄页岩油开发先导试验井组项目中的电驱压裂方式,对配套装备、集成控制、数据采集、施工工艺、操作模式进行全面革新和完善。从主压装备到辅助设备均采用 100%电驱化、橇装化的压裂施工,是胜利油田首个全自动化纯电驱压裂配套输变电工程。

统筹电网平稳运行、供电质量可靠,确保压驱注水、网电钻机用电负荷,在配电网上接得住、保得稳。

4 电驱压裂技术路线

培育形成 6-110kV 各电压等级的页岩油开发供电专用技术和风光荷储多能互补绿色低碳供电方案。在施工效率提升,降低噪音,进一步缩减单井碳排放量和占地面积等方面进行优化。

在一台多井上应用效果最好,即一个井台压裂多口,一次安装的供电工程压裂多口井,具有规模效益,降低单口井的配套费用,

很多的油田建有自己的电网。但是在电网规划布局上没有考虑压裂这种大功率负荷的介入,需要在下一步规划调整时统筹考虑,适当超前建设电网。

1.专项提升。在编制 2022 年配电网隐患治理方案时,提前将制约网电钻机、压驱注水等大负荷可靠接入的瓶颈隐患列入治理范围,将线路提升运行质量和提高保障能力同步考虑。

2.将压驱负荷接入分为配电网干线、配电网分支、配电网末端多种场景,通过手拉手线路倒负荷等手段,不断提升用能装备接入能力。

3.与电力分公司、国家电网高青供电公司、国家电网淄博供电公司经济技术研究院等单位在对胜利油田樊页平 1 开发试验井组 35KV 架空方案进行了两次对接,提升保护匹配,优化大负荷接入后线路分界开关、出口开关、变电站开关等多级保护匹配,实现发生故障后快速隔离,避免越级动作。

4.统筹考虑油田在钻井、压裂、等各个环节电气化,将电气化的投资效益最大化。

5 结论

本项目的顺利实施,拓宽培育了电力新业态创效能力,推进油田修井、压驱、压裂装备电动化替代的进程,进一步开启“地面+井下”终端装备用能电气化,进而研制油电特色智能产品,也为构建钻井、压裂、注采输、压驱补能一系列油气勘探开发全流程绿色低碳高效开发供能场景提供坚实电力支撑。真正诠释了胜利油田“价值引领、创新驱动、资源优化、绿色低碳、合作双赢”的战略部署,从技术可行性上,电力替代方案都是可行的;在经济性方面,主要取决于电力的价格,以及改造更换的相关改造费用,经济性是否可行需具体案例具体分析。基于优惠的绿电价格和环保特性,终端电气化比例的合理提升,还需进一步根据现场情况核实工程的可实施性。需要与绿电储能项目相结合,统筹投资、成本、效益和节能减排的关系,进一步提高能源系统的稳定性和可靠性。

附 录

参考文献

[1] 杨勇 济阳陆相断陷盆地页岩油富集高产规律.《油气地质与采收率》 2023 年第 1 期 1-20,共 20 页

Yang Yong Enrichment and high production regularities of shale oil reservoirs in continental rift basin:A case study of Jiyang Depression,Bohai Bay Basin, Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023,1, 1-20

[2] 张全胜 李明 张子麟 陈勇 张潦源 李爱山. 胜利油田致密油储层体积压裂技术及应用中国石油勘探. 2019 年第 2 期 233-240,共 8 页

Zhang Quansheng;Li Ming;Zhang Zilin;Chen Yong;Zhang Liaoyuan;Li Aishan. Application of volume fracturing technology in tight oil reservoirs of Shengli oilfield.10.3969/j.issn.1672-7703.2019.02.0122

[3]王晓宇. 国外压裂装备与技术新进展[J]. 石油机械, 2016, 44 (11): 72-79.

Wang xiaoyu.Advances in Foreign Fracturing Equipment and Technology. China Petroleum Machinery. 2016, 44 (11): 72-79.

[4] 成浩.关于油田压裂增产改造工艺技术的分析.《信息系统工程》 2023 年第 4 期 95-97,共 3 页

- [5] 雷群, 管保山, 才博, 等. 储集层改造技术进展及发展方向[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46 (3): 580-587.
- [6] 吴奇, 胥云, 张守良, 等. 非常规油气藏体积改造技术核心理论与优化设计关键[J]. 石油学报, 2014, 35 (4): 706-714.
- [7] 吴奇, 胥云, 王晓泉, 等. 非常规油气藏体积改造技术: 内涵、优化设计与实现[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39 (3): 352-358.
- [8] L. WEIJERS, C. WRIGHT, M. MAYERHOFER et al. Trends in the North american Frac Industry: Invention through the Shale Revolution [C]. Paper194345-MS presented at SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, USA, 5-7 February, 2019.
- [9] 吴汉川. 大型压裂装备应用问题解析及发展方向[J]. 石油机械, 2017, 45 (12): 53-57.
- [10] T. JACOBS. New Automated Hydraulic Fracturing Tech Cuts Time and Workforce Needs [J]. Journal of Petroleum Technology, 2017, 69 (5): 32-33.

作者简介

邹兵 男, 1968 年生, 硕士, 从事油田发供电管理工作。

E-mail: zoubing926.slyt@sinopec.com (通信作者)