

中压变频器在页岩气开采中的应用

罗鹏飞¹, 伍俊霖², 苟 波¹

(1. 四川宏华电气有限责任公司, 四川 成都 610000; 2. 泸州老窖股份有限公司, 四川 泸州 646000)

摘要: 非常规油气资源的规模化开发, 带动了压裂设备高速发展。针对柴驱压裂撬散热困难、性能不稳定、运行效率低、每方液耗油量高等问题, 结合负载的机械特性和现场应用工况, 根据 ACS5000 的性能和变频控制技术, 提出了中压变频器在大功率等级电驱压裂泵上的应用优势, 分析了现场压裂的表现情况和保养事项, 总结了常见故障和原因。现场应用结果表明, ACS5000 的 NPC/H-bridge 拓扑结构实现了高电压、小电流输出, 减少了系统发热量; 高效的过程控制在低负载(高压、小排量)压裂环节上表现优异, 控制准确度可达 $0.05\sim 0.1\text{ m}^3/\text{min}$, 实现排量的无极调节; 功率利用率始终保持在最佳状态, 达到有效节能; 每方液体耗电量与施工压力成正比, 平均压力达 $60\sim 100\text{ MPa}$ 时, 每方液体耗电量为 $19.42\sim 29.02\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, 极大地降低了页岩气开采成本。

关键词: ACS5000; 中压变频器; IGCT; 电动泵; 压裂撬; 页岩气

The application of medium voltage drive in shale gas production

LUO Pengfei¹, WU Junlin², GOU Bo¹

(1. Sichuan Honghua Electric Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 2. Luzhou Laojiao Co., Ltd., Luzhou 646000, China)

Abstract: The large-scale development of unconventional oil and gas resources has driven the rapid development of fracturing equipment. In response to the problem of heat dissipation difficulties, unstable performance, low operating efficiency, and high oil consumption per cubic meter of liquid in diesel-driven fracturing skids, combined with the mechanical characteristics of the load and the on-site construction application, based on the performance and frequency conversion control technology of ACS5000, the application advantages of medium-voltage inverters in high-power electric-driven fracturing pumps are proposed, the performance and maintenance of on-site fracturing are analyzed, and common faults and causes are summarized. Field application results show that the NPC/H-bridge topology of ACS5000 achieves high voltage and low current output, reducing system heat generation; efficient process control performs well in low-load (high pressure, low displacement) fracturing, with a control accuracy of $0.05\sim 0.1\text{ m}^3/\text{min}$, achieving stepless adjustment of displacement; power utilization is always maintained at the best state, achieving effective energy saving; power consumption per cubic meter of liquid is proportional to the construction pressure, when the average pressure is $60\sim 100\text{ MPa}$, the power consumption per cubic meter of liquid is about $19.42\sim 29.02\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$, which greatly reduces the cost of shale gas production.

Keywords: ACS5000; medium voltage drive; IGCT; electric pump; fracturing skid; shale gas

0 引言

根据国家能源局发布的《中国天然气发展报告(2024)》, 2023年天然气消费量为

$3.95\times 10^{11}\text{ m}^3$ 。预计到2030年, 天然气消费量约为 $5.24\times 10^{11}\text{ m}^3$ 。天然气消费量的增加, 离不开天然气开发的有力保障, 页岩气在其中扮演重要角色。截至2023年底, 我国累计页岩气产量已超

$1.40 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。随着能源消耗逐年增长,有效提升能源利用率势在必行,页岩气已成为天然气产业的核心增长点^[1-3]。

页岩气开采需使用大型机电设备,柴驱压裂车应用较早,使用中存在一些局限性:散热较差、运行噪声大、转速波动大、功率利用率低、燃油成本高、废气污染大、单机功率小和占地面积大^[4-7]。电驱压裂泵较好地规避了柴驱的短板,在控制上采用了变频技术,起到调节电机转速和转矩的作用^[8]。搭载合适的变频器,电动机将以基础负载所需的转速运行,节电率可达20%~60%^[9]。

1 压裂设备

压裂设备包括压裂撬、混砂撬、供液撬、高压管汇、砂塔(或砂罐车)、仪表撬和测井设备等。压裂撬的作用是将变黏滑溜水^[10]和支撑剂以大排量、高压力的形式注入井内,扩大岩层裂缝,提高地层渗透率,按其驱动方式可分为柴驱压裂车和电驱压裂泵。中小功率等级上柴驱压裂车占主导,大功率等级上电驱压裂泵具有优势。压裂设备正朝电驱化、单机大功率化、体积小型化和控制智能化方向发展^[11],电驱压裂已实现规模化应用,正逐步取代柴驱成为现场应用的主流^[12]。

2 ACS5000中压变频器

电动机的作用是将电能转换为机械能。效率是评价电动机的指标之一,影响电动机系统效率的因素包括:电源质量占44.00%;电流特性占28.48%;负载率占14.23%;泵阻力占7.29%;负载特性占6.00%^[13]。优化效率对于节能减排和提高生产力至关重要。当电动机不被变频器控制时,电动机在负载需求低时依然全速运行。对于负载波动大、空载时间长的泵类负载,变频调速效果尤为明显。

变频器具有调速范围广、控制准确度高、动态响应快、转换效率高和适用范围广等优点,在工业生产中取得了良好的效果。随着技术不断进步,

中压变频器最初在冶金行业中应用,近年来在页岩气、煤层气、致密气和页岩油开采中也得到了广泛应用。

2.1 压裂泵系统

电驱压裂泵系统包括高压断路器、变压器、中压变频器和变频电动机等。高压断路器配合继电保护装置,实现对整个系统的短路保护;变压器实现降压和移相功能;中压变频器是整个系统的核心,以ABB ACS5000系列风冷传动为例,它由NPC和H-bridge结构优化而来,称为NPC/H-bridge拓扑结构变频器^[14]。

ACS5000由U、V、W三相组成。整流器共三相,每一相有两组进线,移相角差 30° ,由两个6脉波桥式二极管串联,构成12脉波整流。变压器阀侧共六组绕组,作为整流器三相的进线,各移相角差 10° ,构成36脉波整流,减小纹波脉动,降低网侧电流谐波畸变率,减少电网谐波污染^[15]。逆变器共三组H-bridge,每组H-bridge包括两个三电平输出逆变单元,构成五电平输出模式,三组H-bridge可构成九电平输出模式。ACS5000系统构成如图1所示。

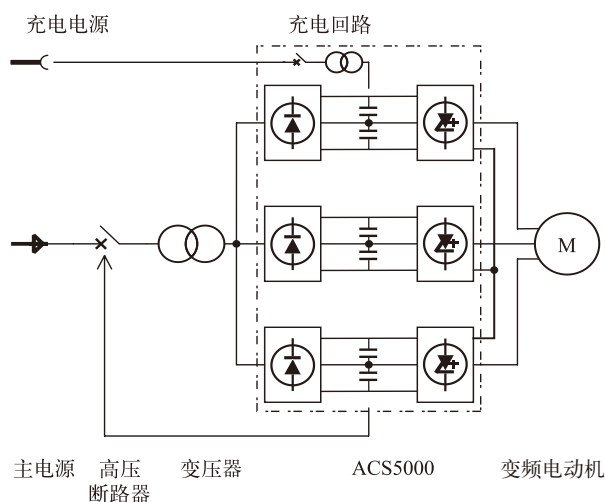


图1 系统构成

Fig. 1 System configuration

2.2 指标和特性

(1) 技术指标

ACS5000采用IGCT作为半导体开关器件。IGCT将GTO芯片与反并联二极管和栅极驱动电

路集成在一起,再使其栅极驱动器在外围以低电感方式连接,结合了晶体管稳定关断能力和低通态损耗的优点。因此,ACS5000具有可靠性好、转换效率高和开关速度快等优点。技术指标见表1。

表1 ACS5000 技术指标

Tab.1 Technical specifications of ACS5000

名称	参数
整流配置	36 脉桥式二极管
输入电压 /V	1 885 (变压器输出额定电压)
电压波动 (%)	±10
功率因数	> 0.96
逆变配置	IGCT
变频器容量 /kV·A	7 000
输出电压 /kV	最高 6.9 (与输入电压有关)
效率 (%)	> 98.5

(2) 特性

1) DTC技术。可实现变频器所能达到的最高转矩和转速性能,在所有条件下均能确保即时和平稳。

2) 掉电穿越。系统能够经受供电干扰,输入电压被短暂切断时,只要电动机运转并为变频器提供能量,变频器就能在无转矩产生的模式下继续运转。供电恢复时立即正常运行。

3) 减少器件。利用大功率半导体开关器件和拓扑结构,减少元器件,降低故障点,提高可靠性。

4) 无熔断器。熔断器具有不可靠、成本高且易老化的特点,无熔断器设计可减少备件,在过电流跳闸后能够快速启动。

2.3 变频技术

压裂施工中,试压、试挤、泵送、打前置液、送球和顶替阶段均属于较低负载,达到最大排量后的施工阶段属于高负载。变频调速在这样的工况下能够发挥极好的效果。

(1) 变频调速基本原理

$$n = \frac{60f}{p}(1-s) \quad (1)$$

式中, n 为转速, r/min; f 为频率, Hz; p 为磁极对

数; s 为转差率, r/min。

(2) 负载机械特性

$$T = 9\,550 \times \frac{P}{n} \quad (2)$$

式中, T 为转矩, N·m; P 为功率, kW。

施工压力一定时,转矩保持不变;压力变化时,转矩跟随变化。

(3) 控制方式

变频器控制方式有电压/频率控制 (V/F)、矢量控制 (VC) 和直接转矩控制 (DTC)。

ACS5000采用DTC技术,直接控制电动机磁通和转矩。将电动机相电流、直流总线电压和晶体管状态作为自适应电动机模型的输入,通过计算,以25 μs为周期输出实际磁通和转矩到对应的比较器。

磁通、转矩误差和定子磁通矢量的角位置,用于计算磁滞控制器中的磁通和转矩状态。这些状态值输入最佳脉冲选择器以选择最佳电压矢量,将每个控制周期中最适当的信号脉冲发送至逆变器中作为开关位置命令,以获得或保持精确的电动机转矩。DTC系统由转矩和速度控制回路构成,工作原理如图2所示。

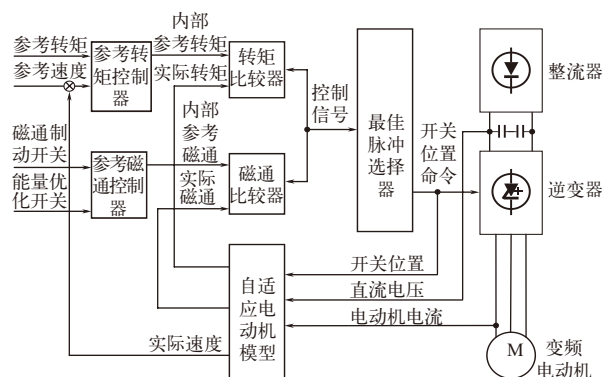


图2 DTC 工作原理

Fig. 2 Operation principle of DTC

(4) 控制板

ACS5000核心控制板为AMC、PEC-INT和Phase-INT。AMC监控传动状态和变量(如速度、转矩、电流和电压等),执行电动机控制和闭环控制功能。PEC-INT用于接地故障检测,配合内部PLC控制高压断路器,与Phase-INT进行数据通

信,并集成IGCT触发和保护功能。Phase-INT用于直流电压和输出电流检测,以及IPS故障和系统短路监控,并与PEC-INT进行数据通信。ACS5000控制板逻辑框图如图3所示。

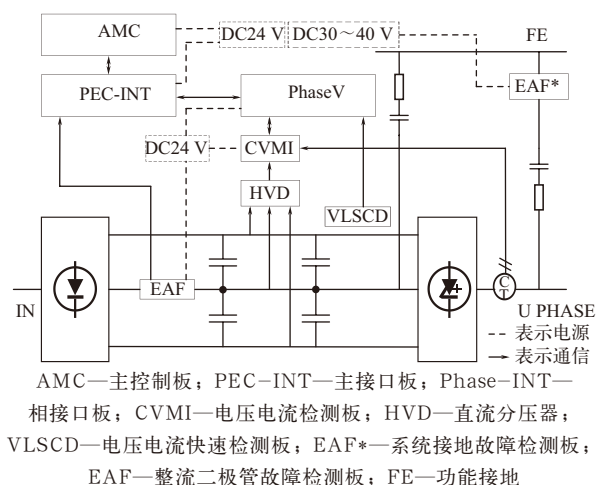


图3 控制板逻辑框图

Fig. 3 Logic diagram of control board

3 ACS5000保养和故障处理

我国页岩气资源开采主要集中在四川盆地,近年来扩大到准噶尔、塔里木、松辽、渤海湾、江汉等地区,不同的地理环境造就了多样的气候。中压变频器作为精密器件也备受考验,新疆地区易发生沙尘暴,可通过防渗膜覆盖和加装高密度过滤棉网的方式防尘。东北地区冬季寒冷,需做好设备保温、除雪和化雪工作;川渝地区夏季炎热,需做好设备降温,保障风冷系统可靠运行。在恶劣环境下,定期维护是保障设备稳定运行的必要条件。

3.1 设备保养

(1) 日常检查

1) 温湿度。温度保持在 $5\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度保持在 $5\%\sim 85\%$,无凝露,湿度大可配置加热器。

2) 沙尘。沙尘浓度低于 30 mg/m^3 ,悬浮灰尘浓度低于 0.2 mg/m^3 。压裂现场若因设备布局受限,吸风口面对砂塔的变频器,则每周至少检查一次。

3) 电缆连接。压裂前全面检查电缆和母线,连接处螺栓无松动。

4) 电缆绝缘。运输和吊装时,电缆表面易受剐蹭,压裂前应进行直流耐压试验和泄漏电流测量,使用绝缘电阻表测量主绝缘和外护层绝缘电阻值。GB 50150—2016《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》中对橡塑电缆绝缘电阻规定如下:耐压试验前后,绝缘电阻测量应无明显变化;橡塑电缆外护套、内衬层的绝缘电阻不应低于 $0.5\text{ M}\Omega/\text{km}$;电缆绝缘测量宜采用 $2\text{ }500\text{ V}$ 绝缘电阻表, $6/6\text{ kV}$ 及以上电缆也可用 $5\text{ }000\text{ V}$ 绝缘电阻表;橡塑电缆外护套、内衬层的测量宜采用 500 V 绝缘电阻表。绝缘电阻与材料的体积电阻率成正比,与长度成反比^[16]。电驱压裂设备常用的电缆长度为 50 m ,按国家标准要求计算其外护套和内衬层的绝缘电阻不应低于 $10\text{ M}\Omega$ 。

5) 控制回路。压裂前全面检查控制回路螺栓无松动,检查所有插头紧密连接。

6) 控制板积灰。控制板是高精密器件,压裂前全面检查控制板无过多积灰,后续根据现场环境定期检查。北方地区沙尘较重,有沙尘暴的工区应做好防尘措施。

7) 过滤棉。压裂前全面检查过滤棉上无过多吸附的灰尘,后续根据现场环境定期检查。取下旧的过滤棉时应轻拿轻放,减少表面灰尘抖落对器件的影响。

(2) 器件清洁

变频器内的灰尘可引起故障,过多的湿气与灰尘会在松动的器件连接处聚集,并对低电平信号造成干扰。因此,需定期清洁变频器内沉积的灰尘,清洁电路板时应注意使用防静电刷和带软喷嘴的真空吸尘器。

3.2 故障处理

ACS5000在发生故障时,故障信息会被输入到故障缓存中并编号,最后一个故障编号为1。故障原因较多,并非与故障代码一一对应,需要根据现场实际情况具体分析。现场使用中常见故障和原因总结见表2。

表 2 常见故障和原因

Tab. 2 Common faults and causes

序号	故障代码	故障名称	故障原因
1	MCB Close Control	高压断路器未闭合	①合闸接触器 K2951 触头故障；②触发外部急停；③变频器与高压断路器之间的控制线（合闸控制和状态线）接触不良；④高压断路器合闸线圈故障；⑤整流变压器接通时冲击过大，继电保护装置动作，导致高压断路器瞬间分断，变频器未接收到合闸状态
2	MCB Open Control MCB Trip Req	高压断路器未断开	①分闸接触器 K2952 触头故障；②变频器与高压断路器之间的控制线（分闸控制和状态线）接触不良；③高压断路器分闸线圈故障
3	Unbalance NP	NP 电压不平衡	①平衡电阻故障；② CVMI 或 HVD 故障；③ HVD 线路接触不良
4	LSU Diode Fault	整流二极管故障	①对应相整流二极管某处故障；② EAF 故障
5	SC INU L	IGCT 故障	①对应相下半桥 IGCT 故障；②功率器件定位杆氧化生锈导致绝缘降低 注：正常 IGCT 阳极与阴极压降 DC0.25 V 左右
6	1stEarthFltMCirc	主回路接地故障	检查直流电压，NP 电压是否正常（正常三相电压应基本平衡），若正常，可能为① EAF* 板故障；②变频器输入和输出电缆对地绝缘击穿；③整流变压器对地绝缘较低
7	Switching Freq 250 ms	250 ms 开关频率	①对应相 IGCT 故障；②变频器出线电缆接触不良
8	DC Volt Unbalance	充电时直流电压不平衡	①辅助电源进线接触不良；②充电回路高压接触器 K1091、K1902、K1903 故障
9	DC Not Charging	无法充电	充电回路低压接触器 K2903 故障
10	FT FaultNotAckn	人为确认故障	发生重大故障后，16.26 FT Acknowledge 被激活，其值为“FALSE”，故障排除后修改为“TRUE”，可执行下一步

变频器发生故障后，信息可在CDP控制盘上查看，也可通过黑匣子读取事件记录。某平台压裂施工时，连续运行约140 min后，变频器发生IGCT故障跳闸。某平台IGCT故障记录见表3。

表 3 IGCT 故障记录

Tab. 3 Faults log of IGCT

序号	事件代码	注释
1	+INT: Fault Class 1	一级故障
2	+DC Undervoltage	直流回路欠电压
3	+Overcurrent	过电流
4	+CBU Short Circuit	直流回路短路
5	+AMC: Fault Class 1	一级故障
6	+INT1 ShortCircuit	A 相 VLSCD 检测到短路
7	+INT2 ShortCircuit	B 相 VLSCD 检测到短路
8	+INT3 ShortCircuit	C 相 VLSCD 检测到短路
9	+INT1 Overcurrent	A 相 CVMI 检测到过电流
10	+INT2 Overcurrent	B 相 CVMI 检测到过电流
11	+INT3 Overcurrent	C 相 CVMI 检测到过电流
12	+INT1 1STFL:SC EXT L	A 相 VLSCD 检测到外部下半桥短路
13	+INT2 1STFL:SC INU L	B 相下半桥 IGCT 故障
14	+INT3 1STFL:FTC FT	通过 FT 链路接收到保护触发命令
15	INU Tripped	变频器跳闸

4 现场应用

4.1 压裂和泵送施工

施工中，电动泵启动时属于重载启动。中压变频器的软启动功能让启动电流更加平滑，避免了系统电压骤降影响正在运转的电动泵，不会对电动机产生过热应力和机械应力，延长电动机寿命。电动机启动完成后，电流趋于稳定，随着排量的提升，电压快速上升，功率逐渐变大。某平台变频器重载启动参数变化趋势如图4所示。

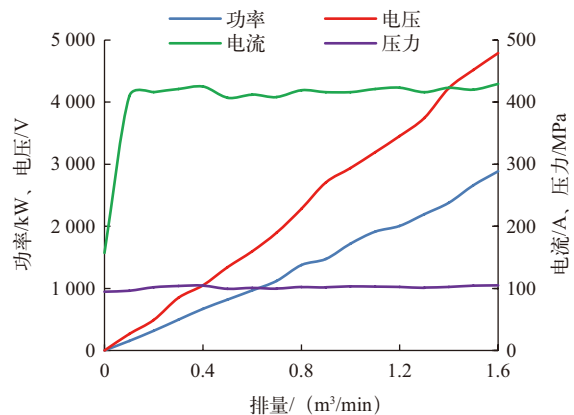


图 4 重载启动参数变化趋势

Fig. 4 Parameter change trend in heavy load start mode

中压变频器转矩可快速反映负载波动,常用于监测液力端,如低压供水极低、砂子异物较多、阀体/阀座损坏与泵头刺漏等,都可通过转矩表现,操作员根据实际情况判断是否停泵。

泵送工艺需求包括:①最小启动排量,一般以 $0.2\sim 0.4\text{ m}^3/\text{min}$ 作为启动排量,中压变频器能够精准适应需求;②排量稳定,在保证供液平稳的前提下,中压变频器能够精确控制电动机转速,转速波动控制在 1 r/min ;③立即停泵,泵送到位后按下“停止”按钮,排量归零,中压变频器立即停止输出。

每方液耗电量是电动泵施工的重要指标,体现出压裂施工成本,计算式为

$$e = \frac{E}{V} \quad (3)$$

式中, e 为每方液体耗电量, $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$; E 为电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; V 为液体量, m^3 。

根据平台施工数据,平均压力达 60 MPa 左右时,每方液体耗电量约为 $19.42\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$;平均压力达 80 MPa 左右时,每方液体耗电量约为 $24.80\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$;平均压力达 100 MPa 左右时,每方液体耗电量约为 $29.02\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 。施工压力越低,每方液体耗电量越小,电能消耗越少。每个压力阶段以12组数据为依据,电动泵在不同压力下每方液体耗电量如图5所示。

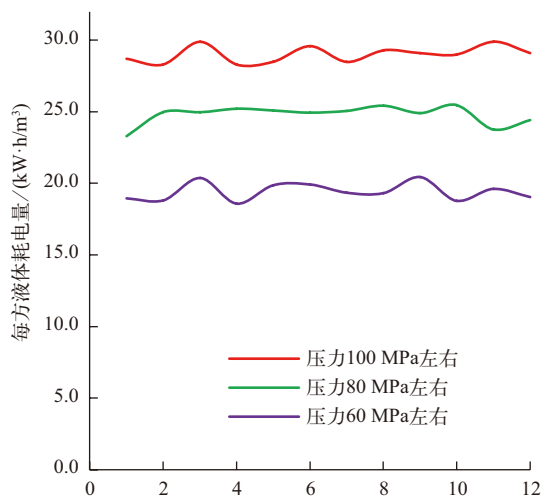


图5 不同压力下每方液体耗电量

Fig. 5 Power consumption per cubic meter of liquid at different pressures

4.2 试压和钻塞施工

试压是压裂前的关键一步,中石油 QSY1553—2012《井下作业井控技术规范》规定:除环形防喷器外的井控装置稳压时间不少于 30 min ,密封部位无渗漏,压降不超 0.7 MPa 为合格。中压变频器控制的电动泵在短流程管汇试压方面表现较好,特别是两寸管汇,以 $0.02\sim 0.05\text{ m}^3/\text{min}$ 排量试压,确保压力平稳升高,不会出现冲破限压值过多的情况,降低了试压风险。某平台两寸管线7号阀试压曲线如图6所示。

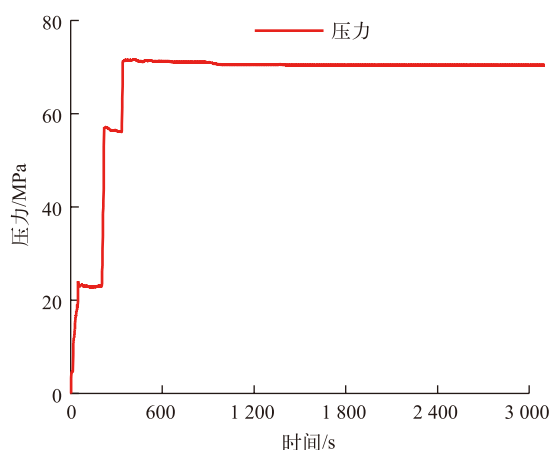


图6 7号阀试压曲线

Fig. 6 Pressure test curve of valve No. 7

钻塞作业是采气前的环节,其目的是钻磨水泥塞和桥塞。根据区块工况定制的可溶桥塞,已达到通井无遇阻的效果^[17],缩短了连油通井周期。钻塞工艺要求排量范围为 $0.2\sim 0.4\text{ m}^3/\text{min}$;且排量输出稳定。中压变频器的排量控制准确度可以精确到百分位,体现了设备极大的适用性和灵活性。

5 结束语

ACS5000的DTC技术直接控制电动机磁通和转矩,实现低转速、高转矩输出,适用于压裂重载启动场合;控制准确度可达 $0.05\sim 0.1\text{ m}^3/\text{min}$,实现排量的无极升降,转速波动控制在 1 r/min ,使施工压力和排量更加平滑;压裂时,单台排量运行在 $1.5\text{ m}^3/\text{min}$ 以上,提高单机负载率,根据施工需求投入备用设备时,不会对施工压力

造成干扰，始终保持功率利用率和电动机效率在最优状态；施工压力越低，电能消耗越少，平均压力达60~100 MPa时，每方液体耗电量为19.42~29.02 kW·h/m³。中压变频器在页岩气开采中的广泛应用，有助于打造环境友好、节能减排和提效降本页岩气田开发平台。

参考文献

- [1] 余晓钟, 刘梦薇, 邱湖森, 等. 我国天然气产业高质量发展路径探讨[J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 1-9.
- [2] 聂海宽, 党伟, 张珂, 等. 中国页岩气研究与发展20年: 回顾与展望[J]. 天然气工业, 2024, 44(3): 20-52.
- [3] 李大伟, 杨京东, 吴康. 基于模块化多电平矿用中高压变频器仿真研究[J]. 煤炭与化工, 2024, 47(2): 95-98, 102.
- [4] 唐瑞欢. 川渝地区页岩气压裂设备发展新方向[J]. 石油机械, 2023, 51(9): 94-100.
- [5] 林蕾. 电驱压裂泵在页岩气开发中的优势分析[J]. 设备管理与维修, 2020(8): 31-32.
- [6] 刘红磊, 周林波, 陈作, 等. 中国石化页岩气电动压裂技术现状及发展建议[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(1): 62-68.
- [7] 张国友. 页岩油全电动压裂装备配置与作业技术研究[J]. 石油机械, 2024, 52(3): 102-107.
- [8] 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.
- [9] 罗权, 易文君, 谢梅英, 等. 电动压裂泵在页岩气开发中的应用[J]. 科技与创新, 2022(3): 133-135, 142.
- [10] 刘雨舟, 张志坚, 王磊, 等. 国内变黏滑溜水研究进展及在川渝非常规气藏的应用[J]. 石油与天然气化工, 2022, 51(3): 76-81.
- [11] 王俊玉, 李彦志, 王志喜, 等. 压裂装备发展现状及发展趋势探讨[J]. 机械研究与应用, 2022, 35(5): 240-242, 246.
- [12] 翁定为, 雷群, 管保山, 等. 中美页岩油气储层改造技术进展及发展方向[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2297-2307.
- [13] 骆超, 马伟斌, 赵军. 电机系统能耗影响因素模型评价与分析[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(8): 98-103.
- [14] 官二勇, 彭劲涛, 金石, 等. ABB ACS5000中压变频器在重庆市华能珞璜电厂的应用分[J]. 电气应用, 2009, 28(1): 72-76.
- [15] 夏梁志, 丁小宁, 程兴民, 等. 24脉波整流电路在大功率电驱压裂系统中的应用[J]. 石油机械, 2020, 48(10): 98-102.
- [16] 孙建生, 张大鹏, 夏俊峰, 等. 电力电缆线路交接试验标准中电缆绝缘电阻规定的探讨[J]. 电工电气, 2020(7): 63-65.
- [17] 张勇, 张国田, 刘宇, 等. 高性能系列可溶桥塞的研制与应用[J]. 石油机械, 2024, 52(1): 124-129.

作者简介

罗鹏飞(1986—), 男, 工程师, 主要从事油气开采领域电气工程及自动化系统工作。

(收稿日期: 2024-12-18)