

超级电容直接耦合技术在抽油机节能改造中的研究与应用

朱松伟^{1,2}, 夏宇^{1,2}, 张康^{1,2}, 庞宝剑^{1,2}, 张成^{1,2}

¹宝鸡石油机械有限责任公司, 陕西 宝鸡

²宝石电气设备有限公司, 北京

收稿日期: 2026年6月17日; 录用日期: 2026年7月9日; 发布日期: 2026年7月21日

摘要

针对抽油机周期性能负载导致的再生能量浪费及传统储能方案结构复杂、成本偏高的问题, 提出不带DC/DC变换器的超级电容应用模式, 将超级电容模组直接并接于抽油机变频器直流母线, 实现下冲程制动能量就地回收、上冲程瞬时释放, 简化系统架构的同时达成节能目标。通过煤层气单井试点验证, 该系统平均充放电效率在95%以上, 单井抽油机日均节电率达10%以上, 系统连续稳定运行一年, 未发生任何故障, 验证了该模式的可行性、经济性与工程实用性, 为油田抽油机节能改造提供低成本、易落地的新路径。

关键词

超级电容, 抽油机, 无DC/DC模式, 制动能量回收, 简单架构

Research and Application of Supercapacitor Direct-Connection Technology in Energy-Saving Retrofitting of Pumping Units

Songwei Zhu^{1,2}, Yu Xia^{1,2}, Kang Zhang^{1,2}, Baojian Pang^{1,2}, Cheng Zhang^{1,2}

¹Baoji Oilfield Machinery Co., Ltd., Baoji Shaanxi

²Baoshi Electrical Equipment Co., Ltd., Beijing

Received: June 17, 2026; accepted: July 9, 2026; published: July 21, 2026

Abstract

To address the issues of regenerative energy waste caused by periodic gravitational loads of

文章引用: 朱松伟, 夏宇, 张康, 庞宝剑, 张成. 超级电容直接耦合技术在抽油机节能改造中的研究与应用[J]. 动力系统与控制, 2026, 15(3): 282-290. DOI: 10.12677/dsc.2026.153029

pumping units, as well as the structural complexity and high cost of conventional energy storage solutions, this paper proposes a simplified supercapacitor application scheme without a DC/DC converter. In this scheme, a supercapacitor module is directly connected in parallel to the DC bus of the pumping unit's variable frequency drive (VFD), enabling local recovery of braking energy during the downstroke and instantaneous energy release during the upstroke. This approach simplifies the system architecture while achieving energy-saving objectives. Pilot verification at a single coal-bed methane (CBM) well demonstrates that this simplified system achieves an average charge-discharge efficiency exceeding 95% and a daily average energy saving rate of over 10% for the pumping unit. The system has operated continuously and stably for one year without any failure, confirming the feasibility, economy, and engineering practicality of this simplified scheme. It provides a low-cost, easy-to-implement new pathway for energy-saving retrofitting of pumping units in oil fields.

Keywords

Supercapacitor, Pumping Unit, DC/DC-Free Mode, Braking Energy Recovery, Simplified Architecture

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景与意义

抽油机(以游梁式为主)作为油田生产核心设备,属于典型往复式位能负载,其运行过程呈现“上冲程重载电动、下冲程轻载倒发电”的周期性特征[1]。传统解决方案中,倒发电产生的再生制动能量多通过制动电阻直接消耗,不仅造成严重的能效损失,还会产生大量热量,加速设备老化。现有超级电容储能方案多采用“变频器 + 双向 DC/DC 变换器 + 超级电容”的复杂架构[2],虽能实现能量回收,但 DC/DC 变换器的引入增加了系统成本、体积与故障点,且转换过程存在额外能耗,不利于边远井场的低成本改造与维护。

超级电容具备毫秒级响应速度、百万次循环寿命、高功率密度及免维护的核心特性,与抽油机“短周期、瞬时性”的能量吞吐需求高度适配[3]。基于此,本文提出不带 DC/DC 变换器的应用模式,通过超级电容与变频器直流母线直接并接,砍掉冗余转换环节,实现“架构简单、成本可控、节能高效”的改造目标,契合“双碳”目标下油田节能降本、轻量化改造的发展趋势。

1.2. 国内外研究现状

国外研究聚焦超级电容与位能负载的能量回收融合,在起重机、电梯等设备中已实现规模化应用,针对油田场景多采用“超级电容 + 锂电”复合电源架构,但均依赖 DC/DC 变换器实现能量调控,系统复杂度与成本较高,适配抽油机低成本改造的方案较少。国内胜利油田[4]、大港油田等已开展超级电容在抽油机上的试点应用,核心突破集中在双向 DC/DC 拓扑优化、能量管理算法改进等方面,虽能实现节能效果,但普遍存在架构复杂、投资成本高、运维难度大等问题。目前,不带 DC/DC 的应用模式尚未形成系统研究,相关工程试点验证与技术规范仍处于空白阶段,本文的研究与应用试验可填补这一领域的技术缺口。

2. 抽油机负载特性与超级电容直接耦合技术适配性分析

2.1. 抽油机运行特性分析

游梁式抽油机通过电机驱动曲柄-连杆-游梁机构,实现抽油杆的上下往复运动,一个运行周期内,功率呈现明显的“双峰值、一低谷”周期性波动:见图 1 所示,上冲程时,电机需输出峰值功率,克服抽油杆、液柱的重力及摩擦力,处于电动工况;下冲程时,抽油杆与液柱的重力势能转化为电能,电机进入再生制动工况(倒发电),此时电能反馈至变频器直流母线,导致母线电压骤升,常规方案通过制动电阻消耗该部分能量,能效损失较大。

倒发电能量具有“瞬时性、短周期、高功率”特点,单次回收能量持续时间短(图 1 工况下倒发电时间为 3.5 秒(图 1 中 0.5 秒至 4 秒处,12.5 秒至 16 秒处),其中制动单元及制动电阻投入时长约 2 秒(图 1 中 1.5 秒至 3.5 秒处,13.5 秒至 15.5 秒处)),无需复杂的能量转换与长时存储,为超级电容无 DC/DC 直接并网提供了天然适配条件。

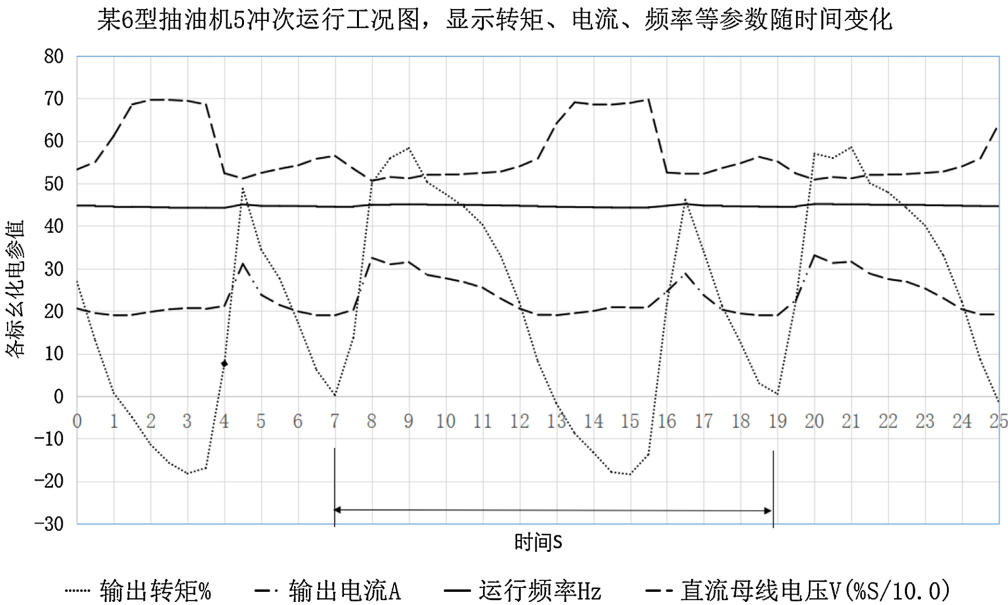


Figure 1. Operation characteristic curves of model 6 beam pumping unit at 5 strokes per minute
图 1. 某 6 型游梁式抽油机 5 冲次运行工况图曲线

2.2. 抽油机倒发电定量化分析

为定量化分析抽油机单次倒发电特性,对中石油煤层气韩城韩 10 向 1 单井进行实地倒发电测量,8 型游梁式抽油机:

测量工具为 FLUKE190-202 示波器,测试接入点为制动电阻上的电压波形。

电动机额定功率 $P_{\text{电机}} = 30 \text{ kW}$;

抽油机冲次为 4 冲次;

直流母线制动单元开启电压 $U_{\text{峰值}} = \text{DC}700\text{V}$;

制动电阻 $R = 10\Omega$;

见图 2 为该 8 型机 4 冲次下倒发电实测曲线, X 轴为时间,单位为秒, Y 轴为电压有效值,单位为伏:

电压峰值 $U_{\text{峰值}} = \text{DC}270\text{V}$;

由欧姆定律知：单次发电峰值功率(制动电阻发热功率)

$$P_{\text{峰值}} = \frac{U_{\text{有效}} \times U_{\text{有效}}}{R} \tag{1}$$

得 $P_{\text{峰值}} = 7.29 \text{ kW}$;

由图 2 可知，倒发电单次持续时间 $t = 3 \text{ s}$ ，示波器显示有效值近似三角形。

根据三角波面积法求得单次倒发电量(制动电阻耗电量)：

$$W_{\text{单次}} = 2 \times \int_0^{1.5} \frac{U_t^2}{R} dt \tag{2}$$

此处 U_t 是关于时间 t 的函数

$$U_t = \frac{U_{\text{峰值}}}{\frac{t}{2}} \tag{3}$$

得 $W_{\text{单次}} = 2.03 \times 10^{-3} \text{ kWh}$

则日倒发电量

$$W_{\text{日发电}} = W_{\text{单次}} \times 4 \times 60 \times 24 \tag{4}$$

得 $W_{\text{日发电}} = 11.69 \text{ kWh}$

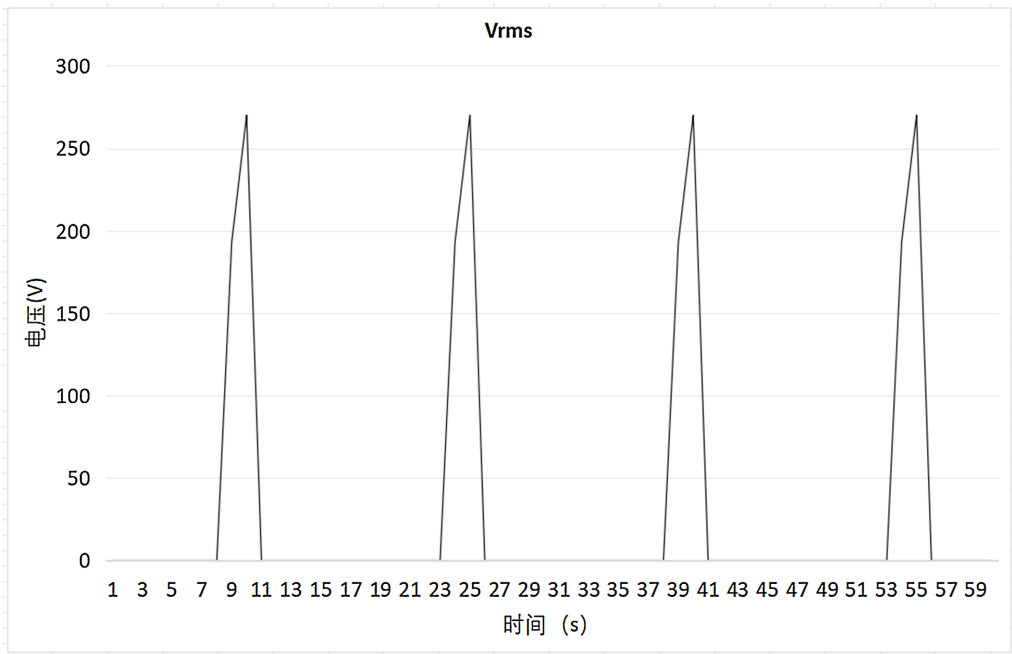


Figure 2. Measured reverse power generation curves of Model 8 pumping unit at 4 SPM
图 2. 8 型抽油机 4 冲次下倒发电实测曲线

2.3. 超级电容核心特性与无 DC/DC 模式适配优势

超级电容的核心特性决定了其无需 DC/DC 变换器即可直接适配抽油机变频器直流母线，具体适配优势如下：

- 高电流倍率特性：持续充放电倍率 $\geq 100C$ 、峰值脉冲耐受倍率 $\geq 1000C$ ，可瞬间吸收下冲程倒发电的瞬时大电流回馈能量，同时快速满倍率释放大电流补充上冲程峰值功率，无需受传统储能电池大电流充放电的寿命衰减与过流保护限制；
- 宽电压适配：超级电容模组可通过串并联组合，匹配抽油机变频器直流母线电压(某国产逆变器输出电压为 DC350V-DC800V)，直接并接后可自适应直流母线电压变化，无需 DC/DC 进行电压转换；
- 高充放电效率：充放电效率 $\geq 95\%$ ，无 DC/DC 转换环节的额外能耗(传统带 DC/DC 模式转换损耗约 3%~5%)，进一步提升能量回收利用效率；
- 长寿命免维护：满充满放循环寿命达 50 万次，在抽油机高频浅充浅放工况下，循环寿命进一步增长，且无需复杂的维护操作，与无 DC/DC 的架构契合，降低运维成本。

2.4. 适配性结论

抽油机倒发电能量的“瞬时性、高功率”特征，与超级电容“快响应、宽电压、高功率密度”的特性高度匹配，无需 DC/DC 变换器即可实现能量的高效回收与释放。不带 DC/DC 的模式，可砍掉冗余转换环节，实现“架构简化、成本降低、效率提升、运维便捷”的多重目标，完全适配抽油机的运行需求与油田低成本改造场景。

3. 不带 DC/DC 的超级电容系统设计

3.1. 系统总体架构

本系统采用“超级电容直接耦合直流母线”的架构，见图 3，取消双向 DC/DC 变换器，核心由五部分组成，具体如下：

- (1) 充放电计量单元：用以计量超级电容模组充放电电量；
- (2) 上电缓冲单元：用以实现超级电容首次限流充电；

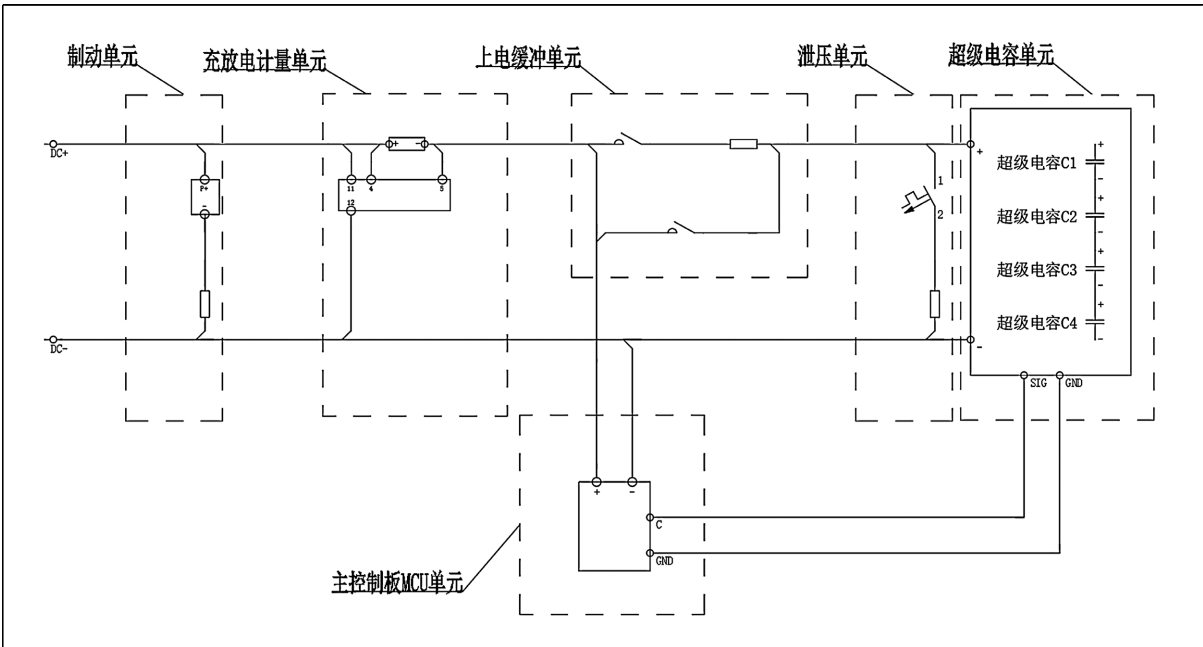


Figure 3. Schematic diagram of DC bus architecture with supercapacitor directly coupled to frequency converter
图 3. 超级电容直接耦合变频器直流母线架构图

- (3) 泄压单元：超级电容检修或切出，用以快速释放超级电容剩余电荷；
 (4) 超级电容单元：超级电容模组，通过串联/并联组合，并接于变频器直流母线正负极；
 (5) 主控制 MCU 单元：用以系统自检，运行期间监测超级电容过压/欠压/过流/过温保护等。

3.2. 核心工作原理

(1) 首次上电：系统接入变频器直流母线，上电缓冲单元限流为超级电容充电，直流母线与超级电容电压达到预设压差后，上电缓冲单元将超级电容并入变频器直流母线；

(2) 抽油机下冲程时，抽油机倒发电导致变频器直流母线电压升高，超级电容模组自动启动充电，快速吸收再生制动能量，将母线电压稳定在逆变器输入电压范围内；抽油机上冲程时，电机进入电动工况，母线电压降低，超级电容模组自动放电，补充负载功率，减少电网供电压力，实现能量的就地循环利用；

(3) 超级电容断开直流母线，手动闭合泄压单元，超级电容放电完毕后进行搬移或检修工作。

3.3. 硬件设计

3.3.1. 超级电容模组选型与组合设计

无 DC/DC 模式下，需要满足 3 点：

1) 超级电容模组的电压工作范围需大于变频器直流母线正常工作电压范围：

需满足以下式(5)关系：

$$U_{\text{制保}} > U_{\text{超容保}} > U_{\text{直流母线}} \quad (5)$$

其中：

$U_{\text{制保}}$ 为变频器制动单元启动阈值电压，为 DC700V。当直流母线电压超过该电压值，变频器制动单元(包括制动电阻)将投入运行，以制动电阻发热耗能的方式降低直流母线电压，保证变频系统正常运行。因此，超级电容的最高运行电压值应低于该保护电压值；

$U_{\text{超容保}}$ 为超级电容保护自动断开阈值电压，设置为 DC680V，该电压略小于 $U_{\text{制保}}$ 。当变频传动系统运行期间直流母线电压高于该电压，表明超级电容已无法有效稳住直流母线电压，超级电容应与直流母线断开；

$U_{\text{直流母线}}$ 为直流母线运行期间最大值，当未配置超级电容时最大值限制在 DC700V，当配置超级电容后，最大值限制在 DC650V。即：当超近电容投入运行后，直流母线电压与超级电容电压值不允许超过该值。同时，该电压值也是选取超级电容运行容量唯一参考值。

2) 超级电容模组的工作电流要大于变频器直流母线倒发电流最大值；按式(1)与式(2)，选择如下单体及组合方式：

- 单体参数：选用额定电压 3 V、容量 360 F，额定电流 44A 的超级电容单体，具备宽温、高可靠性特点，适配油田野外极端环境(-40℃~+85℃)；
- 组合方式：60 个单体串联组成一个 PACK，4 个 PACK 串联组成该超级电容模组，额定电压 DC720V (满足 $U_{\text{超容保}} = \text{DC680V}$ 的需求)，总容量 1.5 F；超级电容模组额定电流 44 A，大于式(1)中 10.4 A (对应变频器直流母线动作电压 700 V 阈值时对应 7.29 kW 功率下峰值电流)，满足要求；

3) 超级电容的容量要大于抽油机单次倒发电能。

投运超级电容后，基于“能量守恒”原则，即单次再生能量完全由超级电容吸收，且引起的直流母线电压抬升不超过 $U_{\text{直流母线}}$ 安全阈值原则，超级电容有效工作电压范围为 DC500V (变频器交流侧对应 AC380V 对应的欠压 AC353V 对应直流侧电压)至 $U_{\text{直流母线}}$ (配置超级电容后允许的直流母线最大电压值)，该电压范围充放电电量如下：

$$W_{\text{超级电容}} = \frac{1}{2} \times C (U_{\text{直流母线}}^2 - U_2^2)$$

(6)

其中 C 是 1.5F , $U_{\text{直流母线}}$ 是 $\text{DC}650\text{V}$, U_2 是 $\text{DC}500\text{V}$, 计算 $W_{\text{超级电容}} = 36 \times 10^{-3} \text{ kWh}$, 远大于式(2)中单次倒发电 $2.03 \times 10^{-3} \text{ kWh}$, 满足要求。

3.3.2. 保护系统设计

无 DC/DC 变换器的超级电容模组直接承受直流母线的电压波动, 因此保护系统的设计是保障系统稳定运行的关键, 采用“分层保护”策略:

- 单体均衡保护: 内置主动均衡模块, 实时调节串联单体的电压, 避免单体过充/过放, 提升模组一致性与寿命;
- 过压/欠压保护: 监测直流母线电压与超级电容模组电压, 当母线电压超阈值 $U_{\text{超容保}}$ 时, 超级电容系统自动切除超级电容与变频器直流母线, 为系统提供硬件保护;
- 过流/过温保护: 限制充放电电流(不超过超级电容额定电流的 1.2 倍), 采集模组温度, 超阈值($+65^{\circ}\text{C}$) 时触发降额运行, 适应油田高温环境。

4. 现场试验与效果分析

4.1. 试验场景与方案

选取煤层气 2 口单井试验, 分别为宜 3-1 单井(6 型抽油机, 22 kW 电机, 3 冲次)、韩 10 向 1 单井(8 型抽油机, 30 kW 电机, 3 冲次)开展现场试验, 试验数据见表 1 宜 3-1 单井超级电容节能运行数据部分记录, 表 2 韩 10 向 1 单井超级电容节能运行数据部分记录。

Table 1. Partial recorded data of energy-saving operation with supercapacitor for Well Yi 3-1
表 1. 宜 3-1 单井超级电容节能运行数据部分记录

日期	抽油机用 电示数 kWh	抽油机 日用电量 kWh	超级电容 充电示数 kWh	超级电容 日充电量 kWh	超级电容 放电示数 kWh	超级电容 日放电量 kWh	超级电容 充放电效率% (放电量/充电量)	总体 节电率%	备注
1	761.9	0	26.9	0	25.6	0	0	0	
2	862.6	100.7	26.9	0	25.6	0	0	0	
3	964.2	101.6	26.9	0	25.6	0	0	0	
4	1064.5	100.3	26.9	0	25.6	0	0	0	投运日
5	1150.9	86.4	51.0	24.1	48.6	23.0	95.4	14.4	
6	1238.3	87.4	80.8	29.8	77.0	28.4	95.3	13.4	
7	1325.6	87.3	109.1	28.3	104.2	27.2	96.1	13.5	

Table 2. Partial energy-saving operation records of supercapacitor system for Well Han 10-Xiang 1
表 2. 韩 10 向 1 单井超级电容节能运行数据部分记录

日期	抽油机用电 示数 kWh	抽油机日用 电量 kWh	超级电容充 电示数 kWh	超级电容日 充电量 kWh	超级电容放 电示数 kWh	超级电容日 放电量 kWh	超级电容充放电 效率% (放电量/ 充电量)	总体 节电率%	备注
1	1554.4	0	198	0	189.1	0	0	0	
2	1655.6	101.2	198	0	189.1	0	0	0	

续表

3	1756.8	101.5	198	0	189.1	0	0	0	投运日
4	1858.3	102.3	198	0	189.1	0	0	0	
5	1948.6	90.3	224.3	26.3	214.3	25.2	0.96	11.2	
6	2039.7	91.1	251.8	27.5	240.7	26.4	0.96	10.4	
7	2130.2	90.5	278.4	26.6	266.5	25.8	0.97	11	

总体节电率计算公式:

$$\eta_{\text{节电率}} = \frac{W_{\text{投前}} - W_{\text{投后}}}{W_{\text{投前}}} \times 100\% \quad (7)$$

其中:

$W_{\text{投前}}$ 为本次数据前三天平均值;
 $W_{\text{投后}}$ 为投切超级电容后当日抽油机电用量;

4.2. 试验数据与分析

试验分析:

- (1) 所配置超级电容容量完全满足抽油机倒发电能回收与再利用, 由表 1、表 2 数据知超级电容充放电效率: 在该抽油机浅充浅放工况下, 超级电容充放电效率均在 95%以上;
- (2) 表 2 中抽油机日节电量, 与式(4)中通过示波器数据计算的日节电量对比(计算包含超级电容充放电 5%损耗量), 基本一致;
- (3) 对比表 1、表 2 抽油机工况, 在一定抽油机电机容量范围(如抽油机容量相差 1~2 档)内, 抽油机倒发电量受其冲次、平衡度等因素制约, 超级电容投运后节电率不同。

4.3. 经济性分析(与带 DC/DC 超级电容对比)

以单井改造为例, 对比无 DC/DC 模式与带 DC/DC 模式的经济性:

- 改造成本: 无 DC/DC 模式单井成本 0.8~1.0 万元(仅超级电容模组 + 保护单元), 带 DC/DC 模式单井成本 1.6~1.8 万元(增加 DC/DC 变换器及配套控制模块), 成本降低 40%以上;
- 运维成本: 按照年运维成本 = 人工工时(2 h/次 × 160 元/h × 4 次) + 单次耗材折旧(25 元/次 × 4 次) + 年备件费(风扇摊销 40 元 + 保险 30 元 + 密封 30 元 + 电容 10 元) + 管理费(现场防护 30 元 + 报告归档 50 元 + 备用库存 30 元)。带 DC/DC 模式需定期维护 DC/DC 变换器, 年运维成本 ≥ 1500 元, 无 DC/DC 模式免维护(只保留必要的人工巡检), 年运维成本 ≤ 500 元, 运维成本降低 66.7%;
- 投资回收期: 按当前工况计算, 无 DC/DC 模式平均约 3 年, 带 DC/DC 模式平均约 6 年, 回收期缩短 50%;
- 长期收益: 单井年节约电费约 3650 元, 单井减少 CO₂ 排放约 0.2 吨/年, 经济与环保效益突出。

5. 结论与展望

本文提出的不带 DC/DC 的超级电容应用模式, 通过超级电容模组直接耦合于抽油机变频器直流母线, 砍掉冗余转换环节, 解决了传统储能方案架构复杂、成本高、能耗高的特点, 得出以下结论:

- (1) 该模式与抽油机负载特性高度适配, 无需 DC/DC 变换器即可实现倒发电能的高效回收与峰值功率补充, 能量回收效率达 95%以上, 节电率达 10%~14%, 优于带 DC/DC 模式;

(2) 与带 DC/DC 模式对比, 超级电容固有的运行电压决定运行容量特性, 超级电容的电压值需要串联到满足直流母线电压值范围, 且低于 DC500V 的超级电容部分处于未充分利用状态, 且带 DC/DC 模式下, DC/DC 可控制直流母线电压, 该模式下超级电容适用电压范围更广;

(3) 系统架构简单, 运维成本降低 66.7%, 投资回收期缩短至 3 年, 经济性与可靠性突出;

(4) 超级电容模组直接并接设计, 安装便捷、成本可控, 适配边远井场、批量改造等油田场景, 无需复杂的技术调试, 易于规模化推广;

(5) 由于试验时间条件限制, 未试验出在抽油机浅充浅放工况下的超级电容年衰减情况, 计划在下一步的试验中验证。就目前试验结果预测, 浅充浅放工况下, 超级电容容量年衰减量按照充放容量占总容量比例减少;

下一步通过远程监测功能优化, 进一步提升系统性能, 结合光伏、风力发电系统拓展应用, 为油田抽油机节能降碳提供更具性价比的解决方案。

参考文献

- [1] 李瑞东. 用于常规抽油机的超级电容器储能装置设计与应用[J]. 节能, 2019, 38(4): 30-32.
- [2] 徐海亮, 兰明君, 赵永杰, 等. 超级电容储能模块在游梁式抽油机中的研究与应用[J]. 科技创新与应用, 2020, 10(26): 180-181.
- [3] 王建元, 王智文, 谢天才. 基于超级电容的抽油机制动能回收系统研究[J]. 东北电力大学学报, 2021, 41(1): 99-106.
- [4] 张中慧, 郑强, 刘晓玲, 等. 抽油机超级电容储能系统[J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(6): 766-772.