

游梁式抽油机电机系统节能技术综述*

王义龙¹, 田春雨², 张连成³, 董伟杰¹, 刘磊², 赵海森⁴

- (1. 北京信息科技大学 机电工程学院, 北京 100192;
2. 大庆石油管理局有限公司 技术监督中心, 黑龙江 大庆 163453;
3. 北华航天工业学院 电子与控制工程学院, 河北 廊坊 065000;
4. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 采油是典型高耗能行业, 由于采油系统存在重载、轻载、空载、发电运行工况, 抽油机系统电源侧、驱动环节以及负荷侧均处于低能效运行状态。因此, 针对性研究此类负荷的节能技术, 是一种实现油田采油系统节能减排的重要途径。对驱动环节应用最为广泛的调压、节能电机、断续供电节能技术的特点与现状进行了系统研究。首先在深入分析抽油机电机(BPM)系统工况与能耗特点的基础上, 对不改变 BPM 运行周期与冲次的非参数型节能技术, 按照不同节能机理与实现方法进行了分类; 其次, 对应用比较广泛的调压、节能电机、断续供电等节能技术的特点进行了系统分析; 最后, 围绕节能效果明显且应用范围更广的节能技术, 提出了系统能效精细化分析、多种节能技术融合、区域性节能综合改造等建议。

关键词: 游梁式抽油机; 节能; 势能负载; 调压; 断续供电

中图分类号: TE 933 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)07-0001-10

doi: 10.12177/emca.2021.047

Overview of Energy Saving Technology for Beam Pumping Motor System*

WANG Yilong¹, TIAN Chunyu², ZHANG Liancheng³, DONG Weijie¹, LIU Lei², ZHAO Haisen⁴

- (1. School of Electromechanical Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;
2. Technical Supervision Center of Daqing Petroleum Administration Co., Ltd., Daqing 163453, China;
3. School of Electronic and Control Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China;
4. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Oil production is a typical high energy consumption industry. Due to the heavy load, light load, no-load and power generation operation conditions of the system, the power supply, drive link and load of the pumping motor system are in low efficiency operation state. To solve these problems, the energy saving technology of this kind of load is analyzed. It is an important way to realize the energy saving of oilfield production. The characteristics and current situation of widely applied technologies such as voltage regulation, energy saving motor, intermittent power supply etc. are studied systematically. Firstly, based on the in-depth analysis of the operation conditions and energy consumption characteristics of the beam pumping motors (BPMs), the nonparametric energy saving technologies

收稿日期: 2021-04-12; 收到修改稿日期: 2021-05-20

* 基金项目: 北京市属高校高水平创新团队建设计划项目(IDHT20180513); 北京市教委科研计划资助项目(KM202111232022)

作者简介: 王义龙(1980—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电机控制、节能新技术及新能源发电。

赵海森(1982—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为高效低振动电机理论研究与设计、电机系统节能及无线电能传输等。(通信作者)

which do not change the operation cycle and stroke times of the BPMs are classified according to different energy saving mechanisms and implementation methods. Secondly, the characteristics of the widely used energy saving technologies, such as voltage regulation, energy saving motor and intermittent power supply, are systematically analyzed. Finally, as for improving the better energy saving effect and widening application field of the energy saving technology, some suggestions like detailed analysis of system energy efficiency, integration of various energy saving technologies, and comprehensive transformation of regional energy saving are put forward.

Key words: beam pumping motors (BPMs); energy saving; potential load; voltage regulation; intermittent power supply

0 引言

油田对电能需求量较大,其中机采系统消耗电能约占采用成本的 1/3。抽油机在运行过程中,由于受负载工况与系统结构等因素的影响,运行功率在一个周期内包含重载、轻载、发电等多种工况,也使得能量处于电能、动能、机械能之间多向转换的复杂运行状态。形成上述状况的主要原因是抽油机上行需要输出很大驱动力矩,用以提升抽油杆,而下行过程中依靠抽油杆自身重力即可克服系统摩擦等阻力矩,此时电机逐渐进入空载或发电状态^[1]。上述复杂运行状态及多级机械结构,使得系统效率显著降低,而构成抽油机系统的电源侧、驱动环节、负荷侧 3 个部分是决定系统效率的主要环节。

对此类负荷,相关学者进行了大量的节能方法研究。针对电源侧,采用电网优化重构、高效变压器、电容补偿以及新能源供电等节能方法^[2]。针对负荷侧,通过调整运行周期等方式实现节能,例如:变频调速、多速电机、磁阻电机、间抽等^[1,3]。驱动环节主要包括电机和机械部分,此环节的节能方法是学者较为主要的研究部分,相应的节能技术所涵盖范围较为广泛,节能技术也较为成熟。针对该环节的节能技术,主要特点是在不改变抽油机运行周期,即保持系统冲程、冲次等参数基本不变的前提下,通过提高电机及机械环节运行效率达到节能目的。由于不改变运行参数,因此可有效保证采油量。其中应用最为广泛的节能技术包括调压节能、节能电机、断续供电、平衡调节等^[1,3]。

本文对游梁式抽油机电机(BPM)系统能耗特点和节能技术原理进行分析。在此基础上,针对驱动环节应用比较广泛的调压、节能电机、断续供电节能技术特点与现状进行了系统研究。最后在对比不同节能技术优点以及局限性的基础上,

针对应用范围更广的节能技术研究方向,提出了系统能效精细化分析、多种节能技术融合、区域性节能综合改造等建议。

1 抽油机系统能耗特点及节能技术分类

1.1 抽油机系统工况特性

图 1 是实测抽油机功率曲线。其平均功率为 8.4 kW,而功率的变化范围达到了 26.9 kW。原因是抽油机在采油过程中,上行时需要输出很大的驱动力矩,用以提升抽油杆。在下行过程中,依靠抽油杆自身重力,只要很小甚至不需要驱动力矩即可克服系统摩擦等阻力矩,此时电机逐渐进入空载或发电状态。上下行时负荷差异较大,同时结构限制平衡装置无法实现与负荷的有效中和,由此导致抽油机系统的负荷变化范围较大。

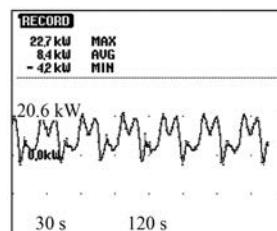


图 1 现场实测一台 22 kW BPM 负荷曲线

1.2 抽油机系统能耗特点

抽油机系统构成可分为如图 2 所示 3 个部分,即变压器及供电线路组成的电源侧,电机及井架机械机构组成的驱动环节,以及抽油杆、液体与泵组成的负荷侧。

由上述分析及图 2 可知,为了满足稳定运行需求,变压器、线路以及抽油机电机的装机容量不低于系统运行最大工况,因此产生“大马拉小车”现象,降低了系统效率。驱动环节的减速箱及四连杆机构能够保障抽油机系统运行稳定,但皮带

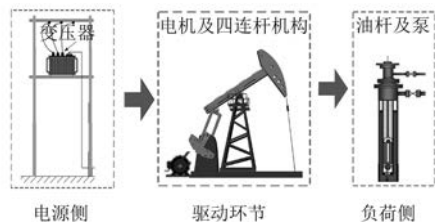


图2 抽油机系统构成示意图

及不同机械环节均会产生摩擦损耗,进一步降低了系统效率。抽油杆及井下设备同样会产生摩擦损耗,同时受产液量及动液面等因素影响,使得提升单位液体的效率较低。

上述3个主要环节产生损耗的共同作用,最终导致系统整体效率较低。

1.3 节能技术分类

根据系统各环节特点,相应的节能技术也有很大差别。针对电源侧,可采用电网优化重构、高效变压器、电容补偿以及新能源供电等。针对负荷需求侧,通常可根据井下参数对抽油机运行周期等参数进行调整的方式实现节能,而上述参数的调整通常是通过电机或控制器实现,例如变频调速、多速电机、磁阻电机、间抽等。

驱动环节主要包括电机和机械部分,这个环节的节能方法是相关学者研究的最主要部分,相应的节能技术所涵盖的范围最为广泛,技术也较成熟。针对此环节的节能技术通常是在不改变抽油机运行参数的前提下,通过提高电机及机械环节运行效率达到节能目的。应用较为广泛的节能技术包括调压节能、节能电机、断续供电等。本文主要针对此环节节能技术进行详细论述。

2 调压节能技术

调压节能是在基本不改变抽油机运行参数的条件下,通过调节电机的输入电压实现损耗的降低,进而提高系统效率。按照不同的节能方法与实现方式,可分为控制调压、绕组结构调压、多技术融合调压等方面。

2.1 控制调压

控制调压节能是以电机模型、运行参数,以及工况特点为基本依据,利用机械或电子开关等设备,改变供电电源电压幅值,实现能耗的降低,达到节能的目的。控制调压在实现方法上可分为模

型控制法和运行参数控制法。

2.1.1 模型控制法

在建立电机模型的基础上,以电机损耗最小为目标函数,根据限定条件得到电机最小损耗与电压对应关系,实现电机损耗最优控制。文献[3]针对周期性变工况负荷电机,以总损耗最小为目标,提出了新的不变损耗与可变损耗划分方法,推导出电机最小总损耗与电压对应曲线关系,通过可测量实现多种工况条件下电压的最优控制。文献[4]针对交流感应电机在恒转矩和变负载条件下的最佳电压调节方法,分析了定子铜、铁损耗与定子电压关系,负载转矩变化对转子铜耗影响,揭示电机的总损耗和最佳电压关系。文献[5]在对电机运行效率与负载工况之间关系详细分析的基础上,推导了最佳调压系数与负载及电机参数间的数值关系,以此为依据提出了调压节能策略。文献[6]建立了可计及铁耗的电机系统能耗实用模型,分析得出油田常见典型负荷条件下电机各项损耗的分布情况,揭示了损耗的变化规律,并通过电压自动跟踪方式对所提出的理论进行了验证。

有些学者提出了以其他运行参数为目标函数的控制方法,其中文献[7]针对抽油机电机轻载与重载交替运行工况,建立了功率因数与调压导通角以及滞留角之间的约束模型,在此基础上提出了自滑动调压控制方法。

2.1.2 运行参数控制法

运行参数控制法是指根据电机输入电压、电流数值,以直接或者通过相关计算得到的参数为依据,进行调压控制的方法。通常依据的参数包括定子电流、有功功率、功率因数等。

(1) 最小定子电流法。电机驱动不同工况负载时,均可实现最高效率的运行,此时定子电流可认为是最优电流。在最优定子电流运行状态下电机的损耗最小,而输入电压与电流一一对应,因此通过调压即可实现。但是电机在实际运行过程中,需要准确知道电机参数,才可计算出最高运行效率所对应的最优电流值,工程应用性受到限制。针对上述问题,很多学者采用最小电流法来实现电机节能目标,包括最小电流跟踪技术、自动寻优控制等^[8-9]。该方法可使电机运行在最高效率附近,节能效果虽然与最优电流比效率有所降低,但

其控制简单工程应用型较强。

(2) 输入功率法。当抽油机负荷需求不变时,在不改变抽油机运行周期等参数的前提下,系统机械效率基本不变,电机的输出功率保持不变。此时通过以电机输入端的有功功率最小为目标函数,即可间接实现电机损耗优化控制,达到节能的目的。当采用电机最小输入功率为目标的控制方法时,异步电机的损耗会处于近似最小的工作状态,相应的效率也处在最优的运行工况下,此时节能效果最为明显^[10]。

(3) 功率因数优化法。当电机运行效率较低时,通过调节电压幅值或者利用晶闸管控制电压的触发角,实现对电流中的无功分量占比、相位的控制,进而可改善电机的功率因数,提高运行效率。文献[11]在抽油机系统调压节能机理的基础上,提出通过续流角来改善电机的运行效率的方法,进而减少电机的有功功率和无功功率。文献[12]中对调压节能方法以及软起动原理进行了详细分析基础上,进一步结合多种节能方法技术特点分析后,提出了交流异步电机基于恒功率因数的节能控制策略。

2.2 绕组结构调压

绕组结构调压是指,通过设计或者调整电机绕组不同结构形式,改变电源作用到每相绕组上的等效电压值,进而实现对电机的调压控制,达到节能目的。油田系统中常用的结构调压方法包括星角转换、延边三角形等。

2.2.1 星角转换

星角转换的实现方式是在电机输入电源不变的条件下,通过改变电机绕组的星接与角接的连接方式,实现对电机绕组供电电压的调整。由图3接线原理可知,当电机角接时,每相绕组施加的电压为线电压,即绕组电压为 380 V;当电机星接时,每相绕组施加的电压为相电压,即绕组电压为 220 V。转换的基本原则是,当驱动功率小于其额定功率 1/3 时,电机就可以进入星接状态,此时绕组上的感应电动势降低,可以较大程度地降低铁耗、实现节能^[13]。

2.2.2 延边三角形电机

延边三角形电机定子绕组的一部分接成角接,另一部分直接与电源连接。这种电机通常可看作是由 6 部分线圈组成,或者理解成在 3 组线

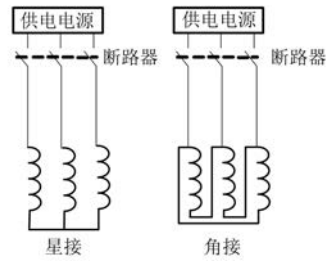


图3 星角转换接线原理图

圈增加抽头形式,接线方式如图4所示。从接线图中可以看出,绕组通常可引出 9 个接线端子,通过对不同接线端子的组合可实现角接、星接延边三角形接法,星接时绕组上等效电压最低、角接最高,延边三角形接线处于两者之间。当 BPM 处于不同运行工况时,采用不同的接线方式,达到节能目的。

相关学者对此也做了很多研究。文献[14]研究了延边三角形电机定子相绕组中抽头接线基本形式,在此基础上计算延边三角形起动的相电压大小与中间抽头位置的关系。文献[15]针对延边三角形异步电机,分析了降压起动过程中电压、电流与转矩的比例关系,在此基础上对定子绕组中间抽头位置的选择以及降低倾边磁场提出了相应的计算方法。

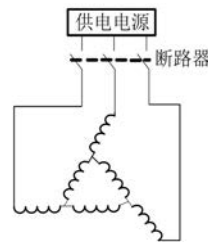


图4 延边三角形接线原理图

2.3 多技术融合调压

控制与结构调压节能方法,虽然实现方式有所不同,但本质是对电机输入或绕组的等效电源进行调整实现节能,节能方法均属于单一调压节能这一范畴。随着负荷工况日趋复杂、节能空间逐渐降低,单一节能方法所取得的节能效果也逐渐降低,为了能够保证或提高节能效果,很多学者把多种节能技术与调压相结合,达到提升节能效果的目的。

文献[16]针对抽油机电机系统调压及平衡

调节节能方法,系统分析了固定调压限制因素以及常规平衡调节对 BPM 系统能效影响的变换规律与节能效果,提出了一种平衡实时动态调节与调压相结合的综合节能方法。先通过平衡可调装置动态调节,降低系统峰值功率,在此基础上,以满足系统最大负载需求为限制条件,以最小能耗为目标函数,通过多级调压节能最终实现系统运行效率的提升,节电效果可达到 15% 以上。

文献[17]针对变频供电条件,提出了变频-调压分段协调运行的综合节能方法。该方法在不同运行区间,根据工况特点给出最优的供电模式,主要包括采用变频控制悬点加速度,降低载荷中的惯性力矩,并在实时监测电机负荷工况状况的基础上,采取跟踪调压提高电机运行效率。

2.4 调压节能效果综合分析

上述调压方法中,控制调压可适用于不同工况条件,适应性及应用范围最为广泛,平均节能效果通常在 5%~10%,但是此种控制方法常需要对电源进行波形控制,增加了谐波污染,同时控制实现上相对较为复杂。绕组结构调压,控制简单,设备使用于寿命长,但适应范围有一定的限制,例如星角转换适用于轻载工况,且波动负荷对其有较大的限制作用,绕组结构调压平均节能效果为 5% 左右。多技术融合调压,节能效果最为突出,通常可达 10% 以上,但此种方法技术实现上较为复杂,对多领域专业知识要求较高。随着节能需求的逐步提高,以及人工智能、大数据、新能源等技术的深入融合,多技术融合调压节能将是未来研究的重点方向之一。

3 非调参型节能电机

非调参型节能电机是指在不改变抽油机周期等运行参数的前提下,通过使用可适应抽油机系统负荷工况特点且本身效率较高的电机,实现抽油机系统的运行效率提升。常用的节能电机包括永磁同步电机(PMSM)、高转差电机、高效电机等。

3.1 PMSM

BPM 所使用的永磁电机通常具有自启动功能。电机转子采用永磁体作为磁极,转子上没有铜耗与铁耗,电机处于同步运行状态,运行功率因数可以接近 1,这使得定子绕组及供电线路中的

电流没有无功分量,可有效降低绕组及线路上的铜耗。与异步电机相比,永磁电机的功率密度较高,起动转矩较大,可一定程度上降低装机容量,上述 3 个方面是电机效率提升的主要途径。但油田供电线路较长,电能质量波动较大,例如线路首段电压可达到 420 V,而线路末端可降低至 360 V,永磁电机对电源质量要求较高,当供电电源与电机额定电压幅值相差较多时,会使得空载电流急剧增加,使得电机发热较大,增加了失磁概率。同时,永磁电机机械特性较强,起动过程对抽油机机械环节冲击较大,一定程度上降低了机械环节使用寿命。

相关学者对永磁电机节能方法做了很多研究。文献[18]针对油田负荷特点,从结构、应用条件等方面,对不同结构形式的高转矩密度、低速大转矩永磁直驱电机进行了对比分析,为实现高性能低速大转矩永磁直驱电机提供参考。文献[19]针对抽油机负载率不高于额定负载 30% 的工况特点,提出了高起动转矩、高效率以及扩大经济运行范围的 PMSM 应用措施,并制订了电机设计准则,实现 22 kW 替代用 37 kW 感应电机,达到节能目的。文献[20]采用优化设计的无阻尼绕组内永磁转子代替鼠笼式转子,以及采用无阻尼绕组的同步磁阻转子代替同步电机中的转子,可进一步降低电机的损耗,实现效率的提升。文献[21]在针对非晶金属定子铁心等材料的 PMSM 的空载铁损、负载损耗和热性能分析的基础上,研究了变频器供电条件下电机的空载铁损、额定负载损耗和热特性的分布,最后对样机的损耗和热性能进行了测试。

3.2 高转差电机

3.2.1 节能原理

高转差电机结构形式上和普通异步电机基本相同,工作原理是通过增加转子电阻值来提高电机的转差率,实现电机的软特性,表达式如下:

$$s = \left(1 + \frac{R_x}{R_0}\right) s_0 \quad (1)$$

式中: R_x 为转子上增加的电阻值; R_0 、 s_0 为正常异步电机转子电阻值及额定功率下的转差率,可认为是常数。由式(1)可知,随着 R_x 增加电机转差率也会增加,电机的转速降低。

高转差电机在 BPM 系统应用过程中,其节能

机理可总结如下^[22-23]。

(1) 降低装机容量。普通的高转差电机的转差率可达 15% 以上。由电机工作原理可知, 电机运行功率 P 与电机负载转矩 T 及转速 n 成正比, 表达式如下:

$$P = K_0 T n \quad (2)$$

BPM 属于势能负荷, 其负载转矩除了重力部分作用外还有加速力矩, 当电机转差率较高时, 速度变化率降低使加速力矩降低, 进而抽油机负载转矩 T 降低, 同时抽油机转速 n 会降低, 最终实现功率降低。因此, 可以用较小容量的超高转差率电机取代目前较大容量的普通电机做到合理的功率匹配, 从而减少其固定损耗实现节能。

(2) 降低平均功率。超高转差率电机在转差率较高运行时其转速有所下降, 在满足运行参数的前提下, 运行周期上升使抽油机一个冲次内的平均功率降低, 进而实现节能目的。

(3) 降低发电工况。通过降低电机运行过程中的输出转矩与转速, 可减少抽油机运行时的发电状态, 进而降低能量转换过程中的损耗。

3.2.2 技术研究现状

相关学者针对高转差电机在油田应用做了相关的研究。文献[24]对比分析了高转差电机与异步电机的机械特性与外特性特点, 通过理论与试验结合的方式验证了高转差电机可提高抽油机运行效率。文献[25]在研究举升工艺技术工作条件、适应性、技术特性、油藏自然特性的基础上, 建立了包括系统举升工艺技术在内的综合优选评价指标体系, 分析了在日产液量增加的条件下, 选用高转差电机与普通配电箱相结合的驱动方式的经济合理性。

3.3 高效电机

中国国内应用比较广泛的高效电机主要是 YE3 系列电机。此类电机通过从设计、材料和工艺上改进, 实现提高运行效率, 其中在铁磁材料上采用了高导磁低损耗冷轧无取向硅钢片; 设计上采用更加优化合理的定子、转子槽数, 改善风扇参数以及正弦绕组等措施降低损耗, 其最终效率可提高 2% ~ 8%。

有关学者针对油田工况特点, 在上述高效电机的基础上, 设计更加适合采油系统的高效率、高起动转矩和较软的机械特性的节能电机, 此种设

计可有效适应抽油机系统转动惯量大以及不均匀冲击载荷的工况特性^[26-27]。

3.4 节能电机效果综合分析

上述节能电机, 永磁电机可适用于不同工况条件的 BPM, 平均节能效果通常可达 7% 以上, 但生产成本较高, 同时退磁现象较为严重等原因限制了其应用范围。高转差电机针对不同工况其节能效果差异较大, 对于负载较重工况节能效果明显, 但轻载时节能效果较低, 因此, 其适用范围受到很大限制。高效电机由于其起动性能良好以及效率高的特点, 使其适用范围最为广泛, 针对恒定负荷节能优势更加明显, 而 BPM 变工况运行条件使其节能效果明显降低。

4 断续供电节能技术

断续供电的节能理念于 2002 年前后由华北电力大学节能研究团队提出。工作原理是根据抽油机负荷特性, 在电机处于空载及发电工况不需要输出功率时, 实施断电操作, 此时电机、变压器及线损均为零。最大限度提高系统节能潜力; 当需要电机输出功率时, 采用了快速软投入技术接通电源, 可有效避免冲击电流对系统带来的冲击。

4.1 节能原理

图 5 是 BPM 一个周期的功率曲线示意图。由图 5 可知, 运行 B 区域时负载逐渐降低进入发电工况, 此时切断电源, 靠外部机械惯性及势能可实现继续运行, 在运行到 C 区域需要驱动力矩时, 采用“快速软投入”技术重新投入电源, 由此完成了一次“断续供电”节能控制^[28]。

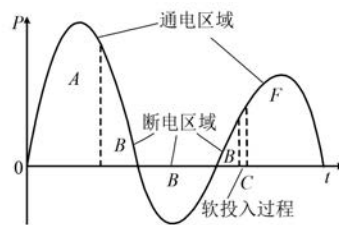


图 5 BPM 断电和通电控制过程

由断续供电节能原理可知, 影响断续供电节能效果的因素主要包含如下方面^[1]。

(1) 断电时间。如果有效地延长断电时间, 相应的节能效果也会显著提升, 发电区域是机械势能释放为动能的过程, 增加的动能可使 BPM 不

需要电机驱动即可进入电动区域,因此,充分利用空载以及发电区域势能,能够提升断电持续的时间。

(2) 投入过程冲击功率。电机从“断电”到“通电”过程,假如直接导通电源,会产生很大的冲击电流并增加损耗。通过相应的控制策略,有效降低电源投入过程的冲击电流,可减少损耗、提高节能效果,同时降低机械冲击。

4.2 节能效果

采用断续供电节能技术,采油系统中大部分的 BPM 均能保证节电率达到 10% 以上,数据如表 1 所示^[1]。其中,在大庆某厂共 18 口井测试平均的有功节电率 18.20%、综合节电率 21.40%。而在整条线路上安装使用,通过变电所收费电表测量,节电率 23.18%。在大港、廊坊等油田长时间运行测试的节电率均在 15.00% 以上。

表 1 37 kW 断续供电节能效果

负荷类型	轻载	一般	重载
峰值功率/kW	18.70	26.00	33.50
常态 P_1 /kW	6.64	7.34	10.15
节能 P_1 /kW	5.43	6.42	8.96
节电率/%	18.20	12.50	11.70

4.3 关键技术研究现状

断续供电节能技术是针对抽油机系统研发的新的节能方法,其中的“断电”与“通电”是实现节能的关键环节。为了保证抽油机系统在“断电”到“通电”控制过程中,抽油机能够稳定运行,且转速等运行参数在合理范围内,则断电时刻准确选择、通电时刻判定与通电过程中实现电源无冲击控制是研究的重点^[29-30]。

4.3.1 “断电”环节关键技术现状

“断电时刻”准确判定是保证系统能够安全稳定运行的前提,也是后续能够实现“无冲击”快速通电控制的基础。针对此环节关键技术,文献[31]在充分考虑驱动环节振动、井下液面等影响因素的条件下,提出一种基于模糊控制的断电时刻判定方法及相应控制策略。文献[32]在对负荷曲线变化规律、电动及发电工况特性参数准确辨识的基础上,设计了以断电后转速变化值为输入变量、功率累加值为输出变量的模糊控制器,实现断电时刻准确判定,通过实际测试获得了良好

的节能效果,实测效果如图 6 所示。由图 6 可知,选取功率处于轻载且下降运行状态作为断电时刻,断电后抽油机继续旋转,且转速变化范围满足设定要求。该方法控制简单、工程应用性较强,但对专家经验依赖性较高。

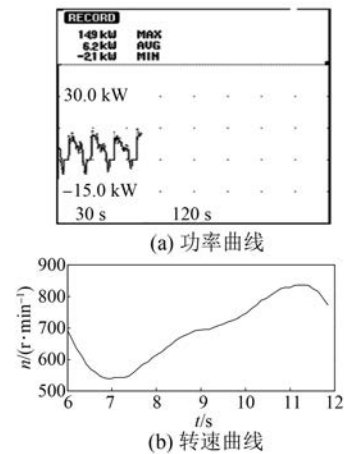


图 6 电机功率及转速变化曲线

为了更加准确有效地控制断电后转速变化范围,文献[33]提出了一种断电后抽油机转速预判的断电时刻准确判定方法。该方法研究了平衡力矩与曲柄位置、悬点、泵载荷与位移之间的关系,揭示不同供电形势下负载转矩随曲柄旋转角度的变化规律,并建立由曲柄角度表示的负载转矩方程,进一步通过电气量预先计算出断电后负载转矩和转速变化趋势,实现了最佳断电时刻准确判定,实测效果如图 7 所示。由图 7 可知,通过转速预判的方法,断电时刻选取更加合理,同时可有效控制转速变化范围,提高系统安全性,但此种方法对系统参数要求较高。

4.3.2 “投入”环节关键技术现状

针对“投入”环节关键技术,文献[34]提出在 0.1 s 内完成电源接入的快速投入控制策略,在建立 $\alpha\beta 0$ 坐标系降阶不对称瞬态模型和空间向量复数变量的对称瞬态数学模型的基础上,揭示了断电后再次通电时冲击电流与触发角度之间的关系,快速计算出初始触发角序列值,最终得到完整的软投入控制策略。文献[35]根据电机断电后定、转子运行特性,求得定子残压解析表达式,并研究了定子残压条件下的电源切换策略和切换时刻判定方法。文献[36]在无残压条件下,在感应电机非对称-对称数学模型的基础上,提出基于

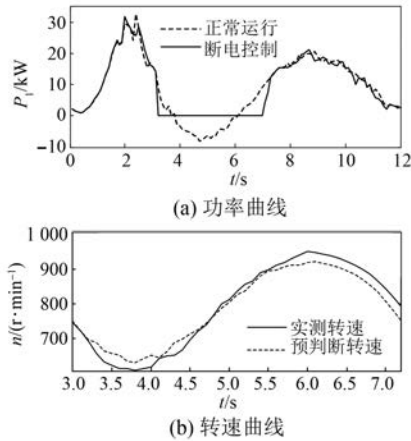


图7 电机功率及转速变化曲线^[33]

真空断路器与晶闸管阀并联方式的电源快速投入感应电机参数解析方法。

在BPM系统控制应用方面,文献[37]在分析电源投入时刻负载转矩和转速以及动态变化对冲击电流的影响的基础上,提出可计及负载动态变化的快速软投入控制方法。该方法依据不同转速条件下投入电源时冲击电流特点,并结合负载转矩动态特性确定最佳电源投入时刻,在上述基础上,以全波投入时产生可满足负载需求转矩为目的,以投入初始时刻电流幅值为限定条件,制订电源软投入触发角的确定方法,最终实现电机产生与负载相匹配的转矩,达到了有效限制冲击电流的目的,效果对比如图8所示^[37]。由图8可知,当控制策略不满足要求时会产生较大的冲击电流,而选择合理的投入时刻和控制方法可有效降低冲击电流,实现电流的“无冲击”控制。

5 节能技术综合对比分析

节能技术是否能够得到推广应用,受到很多因素影响。其中节能效果是基础,但适用范围、技术难度,以及是否对系统产生影响也是推广应用的主要限制条件。对上述节能技术综合对比如表2所示。表2中节能效果数据,通过现场实测、文献检索,以及大庆节能监测中心的抽油机检测平台获得,同时对不同工况条件下的节能数据取平均值作为能效依据。适用范围以某油田节能技术推广数量作为依据;技术难度以及系统影响则以理论分析及实测为依据。上述的对比,在某程

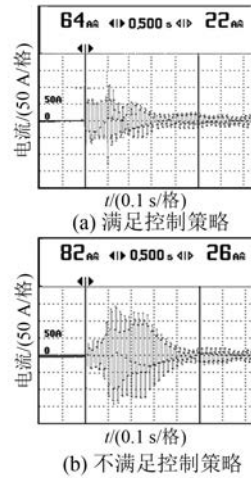


图8 触发过程冲击电流

度上不够全面,但对技术本身特点的比较分析具有一定借鉴作用。

表2 节能技术综合对比

节能技术	轻载节能效果/%	重载节能效果/%	适用范围	技术难度	系统影响
控制调压	12	8	优	中等	有
绕组结构调压	10	7	良	一般	无
综合调压	20	13	优	较高	无
PMSM	12	5	良	中等	无
高转差电机	10	5	良	一般	有
高效电机	5	3	优	中等	无
断续供电	18	12	良	较高	无

6 结 语

节能是降低能源消耗的重要手段之一,针对不同能源消耗形式与工况特点,相应的节能方法与实现方式必然有一定的差异。由于油田机采系统处于复杂运行工况,对该用电领域研发了多种节能技术。随着节能降耗需求的日益强烈以及节能空间的不断缩小,以往的节能方法无法满足节能需求,因此,研究出更加有效提升节能效果及应用范围的新节能技术,成为节能领域研究者面临的挑战。针对上述问题,通过以下研究方向可在一定程度上取得节能效果的提升。

(1) 系统能效机理精细化分析。建立势能系统各环节高精度仿真模型,以此为基础通过对BPM系统各环节的能耗构成机理的深入精细化

分析,揭示出不同环节运行工况变化对本身及其他环节能效影响的变化规律及节能潜力,为后续研究新节能技术奠定理论基础。

(2) 多技术融合。针对单一节能技术效果无法满足节能需求的问题,根据不同节能方法的节能机理与技术特点,采用多技术融合的方式,发挥单一方法作用的同时,补偿或优化其他节能方法的效果,最终有效提升系统节能效果。例如:断续供电、平衡调节、调压相结合,其中平衡调节可降低峰值功率及功率的变化趋势,为提升调压节能效果奠定基础,而调压节能可提升断续供电控制中通电区域的节能效果,同时3种节能技术均可使用电子开关实现控制,成本增加可控。

(3) 区域性节能综合改造。抽油机运行工况复杂多变,针对单井工况特点进行的针对性的节能控制,虽然可较高程度提高节能效果,但应用范围有一定的限制,同时投入较大而导致回收期较长,使得工程应用上有一定的局限性。针对上述问题,可采用对某一条线供电线路或一个区域进行节能综合改造,通过对所有单井负荷功率特性的归纳,划分出理论节能空间,针对不同节能效果,以综合节能效果为目标,以经济指标为限定条件,采用多技术融合节能方法为主体,其他技术辅助结合的综合改造方案,达到预期的目的。

【参考文献】

- [1] 王义龙. 周期性势能负荷条件下电机系统能耗特性及节能关键技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [2] ZHAO H S, WANG Y L, ZHAN Y, et al. Practical model for energy consumption analysis of beam pumping motor systems and its energy saving applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(2): 1006.
- [3] 崔学深, 罗应立, 杨玉磊, 等. 周期性变工况条件下异步电机节能机理和节能途径[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 90.
- [4] ZHONG B, MA L L, DONG H. Principle of optimal voltage regulation and energy saving for induction motor with unknown constant torque working condition [J]. IEEE Access, 2020, 8: 187307.
- [5] 朱常青, 王秀和, 申宁, 等. 油田抽油机用感应电动机调压节能控制策略的研究[J]. 自动化学报, 2007(7): 749.
- [6] 王义龙, 赵海森, 詹阳, 等. 用于游梁式抽油机电动机系统能耗分析的实用模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3909.
- [7] 黄永平, 郭凯, 金玉善. 调压式抽油机节能控制器的研究[J]. 电子学报, 2013, 41(4): 828.
- [8] 李许军, 杨新华, 李宗义, 等. 基于定子最小电流控制的电机算法研究[J]. 数字技术与应用, 2016(2): 137.
- [9] 陈庆协, 蔡友志, 王鹏, 等. 基于最小电流点运行的节能控制器研发[J]. 现代制造技术与装备, 2016(11): 71.
- [10] 李许军. 异步电动机节能运行控制器的研究与实现[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- [11] 房少华. 周期性负载下轻载异步电动机的节能控制综合研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [12] 甘世红, 王知豫, 顾伟, 等. 基于恒功率因数的异步电机节能控制器[J]. 电力电子技术, 2012, 46(9): 106.
- [13] CHANG Y, CHANG H, DAI W, et al. Voltage regulation and maximum output power tracking of a 4.5 kW permanent-magnet synchronous generator [C] // 2014 International Power Electronics Conference, 2014.
- [14] 徐瑞荣. 延边三角形起动三相异步电动机[J]. 电机技术, 2008(5): 46.
- [15] 杨斌文, 熊振国. 异步电动机延边三角形减压起动的研究与设计[J]. 电气应用, 2006(8): 82.
- [16] 王义龙, 许国瑞, 曹彦彦, 等. 适用于周期性势能负荷电机系统的动态平衡-调压综合节能控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6726.
- [17] 赵海森, 王博, 王义龙, 等. 势能负载条件下感应电机变频-调压分段节能控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1490.
- [18] 鲍晓华, 刘估炜, 孙跃, 等. 低速大转矩永磁直驱电机研究综述与展望[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1148.
- [19] 戴武昌, 赵新飞, 杨玉波, 等. 一种适用于抽油机的永磁同步电动机的研发[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(2): 98.
- [20] LI C R, XU D G, WANG G L. High efficiency remanufacturing of induction motors with interior permanent magnet rotors and synchronous-reluctance rotors [C] // 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific) 2017.

- [21] TONG W M, SUN R L, ZHANG C, et al. Loss and thermal analysis of a high-speed surface-mounted PMSM with amorphous metal stator core and titanium alloy rotor sleeve [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019,55(6): 8102104.
- [22] 魏静微,杨崑,谢颖,等.高转差异步发电机转子的三维温度场及旋转热管的应用[J].电机与控制学报,2011,15(7): 82.
- [23] 田春雨.大庆油田游梁式抽油机电动机的节能分析[J].石油石化节能,2013,3(6): 37.
- [24] 宋涛.抽油机工况下电机效率理论分析及实验研究[D].西安:西安理工大学,2007.
- [25] 高翔,吴虞,王帅,等.抽油机井适应性与节能设备匹配优选研究[J].中外能源,2019,24(1): 95.
- [26] 谢颖,蔡翔,单雪婷,等.抽油机用高启动转矩感应电机设计与研究[J].哈尔滨理工大学学报,2019,24(3): 66.
- [27] DEZFOULI M M S, YAZID M Z A, ZAKARIA A, et al. Application of high efficiency motors in HVAC system for energy saving purpose [C] //2018 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD), 2018.
- [28] GIBBS S G. Computing gear box torque and motor loading for beam pumping units with consideration of inertia effects[J]. Journal of Petroleum Technology, 1975,27(9): 1153.
- [29] 罗应立,崔学深.抽油机电机断续供电结合星角变换的控制方法及装置:CN1688100[P]. 2005-10-26.
- [30] LUO Y L, CUI X S, ZHAO H S, et al. A multifunction energy-saving device with a novel power-off control strategy for beam pumping motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(4):1605.
- [31] 王义龙,赵海森,霍承祥,等.抽油机电机断续供电节能技术断电时刻判定方法[J].电力自动化设备,2017, 37(11): 182.
- [32] ZHAO H, WANG Y, CHEN G, et al. Precise determination of power-off time of intermittent supply technology based on fuzzy control for energy saving of beam pumping motor systems [J]. Electric Power Components and Systems, 2018, 46(2): 197.
- [33] 王义龙,赵海森,王泽忠,等.游梁式抽油机电机断续供电节能技术断电时刻准确判定方法[J].中国电机工程学报,2018,38(15): 4537.
- [34] ZHAO H S, WANG Y L, ZHAN Y, et al. Rapid soft re-switching strategy of intermittent supply for energy saving in beam pumping motors systems with dynamic load conditions [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019,55(4): 3343.
- [35] 崔学深,张自力,李和明,等.感应电机电源切换中残压和电压差的研究及最优切换策略[J].电工技术学报,2015,30(2): 162.
- [36] 李卫国,崔学深,罗应立,等.感应电机快速投入控制参数的解析[J].电工技术学报,2013,28(3): 154.
- [37] 王义龙,赵海森,王泽忠,等.计及动态负荷时断续供电节能技术中电源快速软投入控制策略[J].中国电机工程学报,2018,38(18): 5590.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部