

开关磁阻电机在游梁抽油机的应用与分析

梁志宏¹, 李刚², 蒋幽君³, 陈佩斯⁴, 李红伟⁴

(1. 中国石油华北油田公司第五采油厂, 河北 石家庄 050000;

2. 中国石油渤海石油装备制造有限公司第一机械厂, 河北 沧州 062658;

3. 中国石油渤海石油装备制造有限公司新世纪抽油机公司, 河北 沧州 062658;

4. 西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500)

摘要: 分析了游梁抽油机的负载特性, 介绍了开关磁阻电机(SRM)的工作原理及其应用于抽油机电机的特点和优势, 并分析探讨了 SRM 的控制结构及应用于抽油机系统的控制策略。基于模拟抽油机负荷特性建立的 SRM 试验平台进行了测试, 结果表明 SRM 应用于抽油机有很高的运行效率和节能效果。SRM 本身具有结构简单、可靠性高、控制灵活、调速性能好、运行效率高、温升低等优点, 将其应用于抽油机系统有其独特的先天优势, 能提高整个抽油机系统的运行效率和实现较好的节能效果。应用于新疆油田采油厂现场的测试结果进一步验证了该结论。

关键词: 开关磁阻电机; 抽油机; 节能; 节能测试

中图分类号: TM 352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)04-0106-04

Application and Analysis of Switched Reluctance Motor in Beam Pumping Unit

LIANG Zhihong¹, LI Gang², JIANG Youjun³, CHEN Peisi⁴, LI Hongwei⁴

(1. PetroChina Huabei Oilfield Company No.5 Oil Production Plant, Shijiazhuang 050000, China;

2. No.1 Machinery Plant, CNPC Bohai Petroleum Equipment Manufacturing Co., Ltd.,
Cangzhou 062658, China;

3. New Century Pumping Unit, CNPC Bohai Equipment Manufacturing Co., Ltd., Cangzhou 062658, China;

4. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University,
Chengdu 610500, China)

Abstract: The load characteristics of the beam pumping unit were analyzed. The working principle of the switched reluctance motor (SRM) and its characteristics and advantages for applications in the pumping unit motor were briefly introduced. The control structure and control strategy for the SRM used in the pumping unit system were analyzed. The experimental platform of the SRM based on the simulated pumping unit load characteristics was built and tested. The results showed that the SRM was applied to the pumping unit with high operating efficiency and energy saving effect. The SRM had the advantages of simple structure, high reliability, flexible control, good speed regulation performance, high operating efficiency and low temperature rise. Its application to the pumping unit system had unique inherent advantages and could improve the whole operating efficiency of the pumping unit system and realize better energy saving effects. The field test results at the Xinjiang Oilfield production plant further verified this conclusion.

Key words: switched reluctance motor (SRM); pumping unit; energy saving; energy saving test

作者简介: 梁志宏(1976—),男,工程师,研究方向为油田设备管理。

李刚(1981—),男,工程师,研究方向为质量监督体系及计量管理体系。

李红伟(1977—),男,博士,教授,研究方向为配电系统节能、智能控制等。

0 引言

游梁抽油机节能可从两方面入手:一是改变抽油机本身的结构,设计节能型抽油机;二是从驱动设备即电动机及其控制装置入手,采用节能的电动机或驱动设备。其中选用各种节能电机,包括高转差、超高转差、双功率、低速、自变功率和稀土永磁电机等,是一种较好的手段^[1-2]。

开关磁阻电机(SRM)具有独特的优势,如调速范围宽、调速性能优异、损耗低、效率和功率因数高,有良好的起动特性,在低速轻载情况下仍能高效运行,且SRM兼具直流、交流两类调速系统优点。将其应用在抽油机上,能提高抽油机的运行效率,实现节能和降低采油成本的目标^[3-4]。

本文开展了SRM应用于油田抽油机的研究。室内试验和现场应用测试都显示SRM应用于抽油机系统有明显的优势和较好的节能效果。

1 游梁抽油机的负载特点及对驱动电机的要求

目前我国抽油机电机装机总容量超过3 500 MW,每年耗电量逾百亿千瓦时,其中,游梁抽油机使用最为广泛,占总抽油设备的70%以上。游梁抽油机存在波动较大的扭矩特性,使抽油机对其驱动电机特性要求非常苛刻。游梁抽油机驱动电机一般应满足下列要求^[5-6]:

(1) 电机要有较大的起动转矩,以便克服平衡块的惯性,使抽油机能够顺利起动。

(2) 要求电机有较宽的效率曲线和功率因数曲线,具有足够的瞬间过载能力。

(3) 在一个周期中,电机将有一段时间处于发电状态,要求发电时能够将发电能量消耗掉或回馈给电网。

(4) 抽油机在上、下冲程换向时应降低电机转速,以减轻换向对抽油杆的冲击,减小抽油杆的弹性形变,延长抽油泵的实际行程。

上述(1)和(2)的要求相矛盾,选用功率较大的电机能够满足起动要求,但电机运行时负载率较低,造成运行效率和功率因数低,普遍存在“大马拉小车”现象,平均负载率低。如某油田统计了Y系列常规异步电机运行测试数据,异步电机

负载率低于20%的抽油机占总数的42%,功率因数低于0.4(油田功率因数节能标准为0.4)的抽油机占总数的83%。

2 开关磁阻电机的特点及其控制策略

2.1 SRM工作原理及特点

与传统的定子绕组接至三相正弦交流电源并在气隙中形成旋转磁场的电动机结构不同,SRM是定、转子双凸极结构,且定、转子极对数不同。定、转子由高性能冷轧硅钢片叠压而成,转子上无绕组也无永磁体,定子上绕有集中绕组。SRM运行原理与传统交、直流电动机有着根本的区别,遵循“磁阻最小原理”,即:磁通总要沿着磁阻最小的路径闭合,而具有一定形状的铁心在移动到最小磁阻位置时,必使自己的主轴与磁场的轴线重合。SRM可以在四象限运行而且特别适用于环境恶劣的地方,如易于产生粉尘或爆炸的环境以及采矿等场合的传动装置^[7-8]。

结合抽油机对驱动电机的要求,由于SRM具有如下优势和特点,将其应用于抽油机系统可提高抽油机的效率:

(1) 功率因数高。在从0到最大转速的调速范围内,功率因数均大于0.9,特别在转速及负载经常变化的情况下,节能效果更加明显。

(2) 起动转矩大,起动电流小。起动转矩为额定转矩的1.5倍以上。最大起动转矩可达额定转矩的2~3倍,能有效避免大马拉小车的现象,且没有因倒发电对电网的冲击现象。

(3) 无级调速,调速范围宽。可根据不同井况任意调速,可频繁正、反转运行。无换向机构,能简化立式(塔架式)抽油机的机械结构。

(4) SRM可低速运行,且效率高,发热小,无需增加散热风机。

(5) 换向平稳。

(6) 接口丰富。可接开关量/模拟量扩展板、PLC、触摸屏,可实现远程控制。

(7) 结构简单,可靠性高,可长时间运行。

2.2 SRM应用于抽油机的控制策略

所设计的SRM控制器以TMS320F2812为核心构成了SRM双闭环调速系统,软件结构框图如图1所示。系统有速度环和电流环两个反馈,其中电流环为内环、速度环为外环。控制器以恒定

的斩波频率控制功率变换电路中主开关器件的开关,并通过调节占空比来调节相绕组两端的平均电压,从而实现调速。

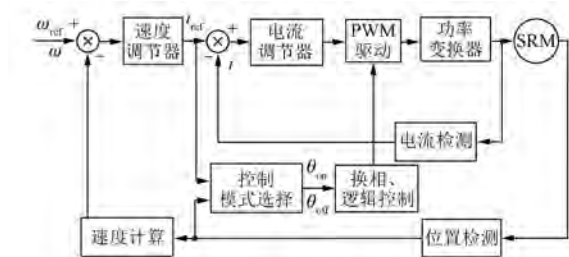


图1 SRM 控制结构图

针对抽油机的变负荷特性,拟通过优化 SRM 基本运行参数,降低悬点最大载荷与最小载荷差值,使 SRM 运行更加平稳,并提高开关磁阻电动抽油机的工作效率,减少电动机内部的各种损耗,达到节能的目的。

SRM 调速系统拟采用如下控制策略:

(1) 起动采用电流斩波控制(CCC)。起动转矩大,起动电流小,并能保证转矩平稳变化,实现 SRM 的软起动。

(2) 抽油机上下冲程采用不同的控制策略。

上冲程时系统处于电动运行状态,采用固定角度的电压斩波控制方式,通过调制 PWM 占空比改变定子绕组两端的有效电压,从而改变电磁转矩及转速。

下冲程时系统处于倒发电状态,采用固定角度的电流斩波控制,根据现场工况及时改变限流幅值的大小,通过电流斩波控制改变绕组电流的大小,控制输出转矩,起到调速作用。

3 试验测试及现场应用效果

3.1 模拟抽油机变负荷特性下 SRM 节能分析

选择普通异步电机、变频器+普通异步电机、SRM 带动模拟抽油机负载特性的变负荷负载,通过试验对其特性进行分析和对比。3 种抽油机驱动系统在模拟抽油机变负荷负载下的节能效果如表 1 所示。

从表 1 可见,在所搭建的模拟抽油变负荷特性的负载下,基于 SRM 的抽油机系统相对于普通三相异步电机平均节电率为 36.3%,相对于变频器+普通异步电机平均节电率为 10.7%,显示了

SRM 的高效率。可见,SRM 有更低的工作电流。当然,这里仅仅比较了节电率,考虑到 SRM 高功率因数、低起动电流等特性,其对整个油田机采系统电网、变压器等都带来了潜在的经济效益。因此,在抽油机中应用 SRM 系统具有较大的优势。

表 1 模拟抽油机负荷运行得到的数据结果

类别	最大工作电流/ A	不同时间下的 耗电量/kWh			每分钟 升降 次数
		10 min	20 min	30 min	
三相异步电机	12	0.28	0.47	0.81	6
变频器+异步电机	11	0.19	0.35	0.58	6
SRM	10	0.17	0.31	0.52	6

3.2 游梁抽油机现场应用测试结果

2013 年 7 月把所开发设计的 SRM 控制器及选配的电机应用于某采油厂,在油井 81520、85060 上应用 SRM 拖动控制系统进行节能改造,各应用 1 台 SRM。具体设备参数如表 2 所示。

表 2 改造前后设备清单

项目参数	油井 85060		油井 85120	
	改造前	改造后	改造前	改造后
电机类型	同步电机	SRM	同步电机	SRM
电机型号	CJT-10C	SRY-280L-6	CJT-12A1	SRY-280L-6
功率/kW	37	45	45	45
转速/(r·min ⁻¹)	680	1 000	680	1 000

设备可靠运行两年多,经历了新疆油田野外风沙粉尘、高低温差(夏天戈壁滩上温度最高 50℃,冬天最低温度-30℃)的恶劣环境的考验,显示了 SRM 可靠性高,具有良好的适应性。现场委托中石油天然气集团公司某油田节能监测中心进行了测试,测试结果如表 3 所示。

从表 3 可见,SRM 应用于油井上节能效果比较明显。节能经济效益具体体现在下面几个方面:

(1) 平均产液单耗大大降低,两口油井下降率分别为 11.7% 和 29.9%。

(2) 电机效率提高。更换电机后 2 台电机的有功节电率分别为 15.2% 和 11.2%,而且这只是有功节电率单一指标的效果,没有考虑采用 SRM 后产能的增加。

表 3 测试结果汇总表

项目名称	油井编号			
	85120		85060	
	改造前	改造后	改造前	改造后
电机输入平均有功功率/kW	10.40	8.82	6.83	6.07
电机平均功率因数	0.331	0.832	0.254	0.695
电机输入平均无功功率/kvar	29.60	5.91	26.06	6.29
电机输入平均视在功率/kVA	31.37	10.61	26.94	8.77
油井平均日产量/(t·d ⁻¹)	4.30	4.90	4.60	6.05
平均产液单耗/(kWh·t ⁻¹)	48.97	43.24	34.28	24.04
平均百米吨液单耗/kWh	2.43	2.17	2.04	1.40
平均产液单耗下降率/%	—	11.7	—	29.9
平均百米吨液单耗下降率/%	—	10.4	—	31.5

(3) 产油量提升。井号 85120 从原产 4.30 t/d 增加到 4.90 t/d, 增加了 14.0%; 井号 85060 从原产 4.60 t/d 增加到 6.05 t/d, 增加了 31.5%。

(4) 功率因数大大提高。所测试的 2 台电机功率因数, 1 台为 0.832, 另 1 台为 0.695, 无功节电率分别达到了 80.0% 和 75.9%, 视在功率分别下降了 66.2% 和 67.4%, 约为 2/3, 可知对应线路平均电流也下降了 2/3。

从改造节能效益来讲, 体现在如下方面:

(1) 平均产液单耗下降直接带来经济效益。一个采油厂年产 200 万吨油, 则可以节约电费(按平均下降 5 kWh/t 来计算, 即平均产液单耗下降值, 取表 3 中能耗降低的较小值, 即 85120 号油井对应的改进前后平均产液单耗下降值, 电费 0.8 元/kWh):

$$200 \times 5 \times 0.8 = 800 \text{ 万元。}$$

(2) 提高产油量。按一个采油厂 3 000 口油井, 每口井每日提高采油量 0.5 t, 平均运行周期

为 360 d 计算, 一年增加产油量为

$$3\,000 \times 0.5 \times 360 = 540\,000 \text{ t。}$$

(3) 功率因数提高可节省大量就地无功补偿设备。国内低压电容器成本为 10~15 元/kvar, 仍假定一个采油厂 3 000 口油井, 平均额定功率为 37 kW, 虽然抽油机平均负荷较低, 但异步电机的无功需求量仍很大, 按补偿总需求无功功率容量的 2/3 计算约为 16 kvar, 则节约的成本为

$$3\,000 \times 16 \times (10 \sim 15) = 480\,000 \sim 720\,000 \text{ 元。}$$

(4) 降低网损和线路的投资。无功需求大大减少, 且因 SRM 起动电流小, 在同样负荷的情况下, 变压器容量只需要原来的 1/3。功率因数提高后, 线路电流大大降低, 不足原来的 1/3, 而网损与电流的平方成正比, 网损可降低至原来的 1/9, 间接产生很大的经济效益。单从降低网损来计算, 克拉玛依油田电网年耗电量约 $250 \times 10^4 \text{ kWh}$ (2010 年), 网损率约为 7%, 假定安装 SRM 后网损率降低 50%, 则节能效益为

$$250 \times 10^4 \times 0.035 \times 0.8 = 70\,000 \text{ 元。}$$

(5) 在不改变变压器容量的情况下, 同样容量的变压器供负荷能力可以提高 3 倍, 导线的带负荷能力也提高了 3 倍, 因此可以大大节省扩建或改建的投资费用。

4 结 语

本文介绍了 SRM 工作原理, 并分析了 SRM 应用于抽油机系统的控制策略。基于所设计的 SRM 调速系统和建立的试验平台开展了 SRM 的节能分析以及油田现场抽油机系统的应用测试。结果表明: SRM 本身具有结构简单、坚固、工作可靠、调速系统控制灵活、调速性能好、整体运行效率高、温升低等优点, 将其应用于抽油机系统有其独特的优势, 能提高整个抽油机系统的运行效率和实现较好的节能效果。

【参考文献】

- [1] 白连平, 王玉生. 游梁抽油机节能电机选择方法的讨论[J]. 钻采工艺, 2007, 30(2): 94.
- [2] 白连平, 马文忠. 异步电机节能原理与技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [3] 胡明艳. 游梁式抽油机传动系统效能分析与节能技术研究[J]. 化学工程与装备, 2018(7): 155.

(下转第 125 页)

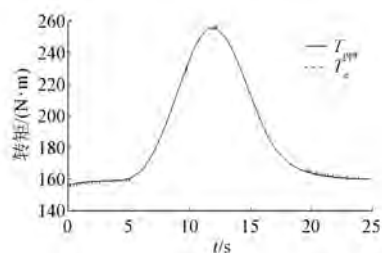


图7 最优转矩跟踪情况

功率调节良好,转子控制电压连续,控制产生的抖振可以大幅减轻。

4 结 语

本文分析了 DFIG 特性,建立了双馈发电系统模型,设计了超螺旋二阶滑模控制器,并在突变风的情况下进行了仿真,验证了所设计的方法具有良好的最优转矩跟踪和无功功率的调节能力,比一般控制方法鲁棒性强,转子控制电压连续,能够大幅减轻控制产生的抖振。

【参考文献】

- [1] MOOR G D, BEUKES H J. Maximum power point trackers for wind turbines [C] // 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2004: 2044.
- [2] 张阁,杨艺云,肖静,等.基于分区变步长爬山法的双馈风机 MPPT 控制策略[J].电气传动,2016,46(11): 51.

- [3] 张小莲,郝思鹏,李军,等.基于灰色关联度的风机 MPPT 控制影响因素分析[J].电网技术,2015,39(2): 445.
- [4] MOHAMED A Z, ESKANDER M N, GHALI F A. Fuzzy logic control based maximum power tracking of a wind energy system[J]. Renewable Energy, 2001, 23(2): 235.
- [5] 黄琳妮.基于群飞蛾扑火算法的风力发电系统 PI 控制参数优化整定[D].广州:华南理工大学,2018: 49-68.
- [6] 李正明,单晓晨,徐鹏坤.基于超螺旋滑模控制光伏 MPPT 的实现[J].电力系统保护与控制,2018,46(21): 32.
- [7] 张开明,史宏俊,郭涛.采用滑模自适应控制的 PMSG 最大功率控制[J].电力系统及其自动化学报,doi:10.19635/j.cnki.csu-epsa.000076.
- [8] 夏长亮.双馈风力发电系统设计与并网运行[M].北京:科学出版社,2014.
- [9] 邱伟康,陈宇,文刚,等.九开关双馈风力发电系统的恒定开关频率电流滑模控制方法[J].中国电机工程学报,2018,38(20): 6134.
- [10] 马祎炜,俞俊杰,吴国祥,等.双馈风力发电系统最大功率点跟踪控制策略[J].电工技术学报,2009,24(4): 202.
- [11] 苏勋文,徐殿国,杨荣峰,等.双馈风电机组 MPPT 动态功率特性分析[J].电源学报,2017,15(3): 156.

收稿日期: 2018-10-11

(上接第 109 页)

- [4] 王博,赵海森,李和明,等.用于模拟游梁式抽油机电动机动态负荷的测试系统设计及应用[J].中国电机工程学报,2014,34(21): 3490.
- [5] 刘一山,薛建强,王林平,等.游梁式抽油机电动机断续供电节能技术断电时刻准确判断方法[J].中国电机工程学报,2017,37(8): 1.
- [6] 田景文,吴浩,高美娟.基于开关磁阻电机的抽油机

节能控制系统[J].机床与液压,2008,36(7): 314.

- [7] 王宏华.开关磁阻电动机调速控制技术[M].北京:机械工业出版社,2014: 237-248.
- [8] 赵强,张玉成,张俊伟,等.四象限运行开关磁阻电机在矸石山提升机中的应用[J].煤矿机械,2011,32(8): 194.

收稿日期: 2018-10-11