

油井套管脉冲电流阴极保护电源控制系统研究

许庆, 周好斌, 张涛

(西安石油大学 材料科学与工程学院, 西安 710065)

摘要: **目的** 设计一种智能化油井套管脉冲电流阴极保护电源控制系统, 实现电源的智能化运行, 确保保护效果最佳。 **方法** 采用三层闭环控制策略实现电源的自适应调节, 采用先进的处理算法对输出电流、输出电压、套管电位进行处理, 判断脉冲电流阴极保护的效果, 输出相应的 PWM 控制信号, 并对电源的输出参数进行实时调节。 **结果** 在 5.0 m×0.5 m×0.5 m 的 PVC 绝缘水槽中模拟油井套管脉冲电流阴极保护系统, 该系统能控制输出频率、幅值、占空比均可独立调节的脉冲电流, 使 40 角钢的保护电位达到 -0.85 V。 **结论** 该控制系统可以实现油井套管脉冲电流阴极保护电源的智能化运行, 具有投入成本低、可靠性高、功能完善、操作方便等优点。

关键词: 油井套管; 脉冲电流; 阴极保护; 控制系统; 智能化; 三层闭环控制

中图分类号: TG174.41

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)11-0087-04

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.11.014

Intelligent Pulse Current Cathodic Protection Power Supply Control System for Oil Well Casing

XU Qing, ZHOU Hao-bin, ZHANG Tao

(School of Material Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: **Objective** To design a kind of intelligent control system of pulse current cathodic protection for oil well casing, realize the intelligent operation of power supply, and make sure that the cathodic protection of oil well casing pulse current is in the best condition. **Methods** Three-level closed-loop control strategy was adopted to realize the adaptive regulation of power supply. The advanced processing algorithm was used to deal with the output current, output voltage and casing potential, to determine the protective effect of pulse current cathodic protection, and output the corresponding PWM control signal to achieve real-time control of the power supply. **Results** A pulse current cathodic protection system of the oil well casing was simulated in the PVC insulated sink of 5.0 m×0.5 m×0.5 m. This control system could control the pulse current with independently adjustable output frequency, amplitude and duty cycle, and the protection potential of the steel reached -0.85 V. **Conclusion** This control system could realize the intelligent operation of power supply of pulse current cathodic protection for oil well casing, with advantages of low cost, high reliability, perfect function, and convenient operation.

收稿日期: 2015-06-05; 修订日期: 2015-07-24

Received: 2015-06-05; Revised: 2015-07-24

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2013KTCL-04)

Fund: Supported by Shaanxi Provincial Science and Technology Innovation Project Co-ordinating Projects(2013KTCL-04)

作者简介: 许庆(1990—), 男, 陕西人, 硕士研究生, 主要研究方向为油气管道腐蚀与防护技术。

Biography: XU Qing(1990—), Male, from Shaanxi, Master graduate student, Research focus: corrosion and protection technology of oil and gas pipeline.

通讯作者: 周好斌(1965—), 男, 陕西人, 教授, 主要研究方向为油气管道腐蚀与防护技术。

Corresponding author: ZHOU Hao-bin(1965—), Male, from Shaanxi, Professor, Research focus: corrosion and protection technology of oil and gas pipeline.

KEY WORDS: oil well casing; pulse current; cathodic protection; control system; intelligent; three-level closed-loop control

研究表明,应用脉冲电流对油井套管实施阴极保护可有效延长套管的保护深度,获得更均匀的保护电流密度分布,使一些深井或超深井的套管得到有效的全线保护^[1-5]。加拿大、中东阿曼油田等在20世纪90年代后期已推广使用脉冲电流阴极保护技术^[6-9],在国内该技术目前还处于起步阶段^[10-12]。普通直流型阴极保护电源输出的是波形随时间变化不大的直流电流,脉冲电流阴极保护电源输出的是波形随时间高速变化的脉冲电流,且脉冲电流的频率、幅值、占空比均实时变化。因此,相比于普通直流型阴极保护电源,脉冲电流阴极保护电源对控制流程、策略及方法要求更高。

本文设计一种油井套管脉冲电流阴极保护电源控制系统,可以自动检测外部反馈信号并生成控制信号,用来驱动功率开关管工作,实时调节脉冲电流的输出参数,实现电源系统的自动化运行,同时扩展其他诸如故障自检、人机交互、GPRS无线数据传输功能^[13],使其成为一个功能完备的智能化电源系统,对油田的数字化建设具有重要的意义。

1 系统结构

如图1所示,油井套管脉冲电流阴极保护电源是在二次逆变体制(即AC—DC—AC—DC—AC)的基础上构建功率主电路,同时构建控制单元对功率主电路进行实时控制。功率主电路采用二次逆变结构,负责生成频率、幅值、占空比均可控的脉冲电流;控制单元负责对外部信号(如输出电流、电压、套管电位)进行采集与计算,并且根据控制算法对脉冲电流的输出

参数进行实时调节,使得套管的保护电位始终处于最佳范围,从而确保油井套管获得最佳的保护状态;在此基础上,对故障自检、人机交互、GPRS无线数据传输功能等外围功能进行扩展。

2 控制系统

控制系统以SH99F100为核心控制芯片,采用高频开关技术、数字化技术和软开关技术,对油井套管脉冲电流阴极保护电源进行控制^[14]。本系统包括硬件系统和软件系统两部分。

2.1 硬件

油井套管脉冲电流阴极保护电源控制系统的硬件组成如图2所示。

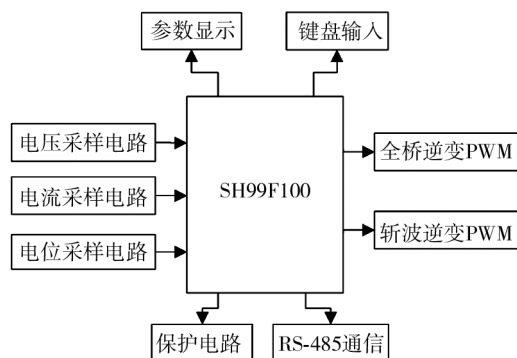


图2 控制系统的硬件组成

Fig. 2 Hardware components of the control system

2.1.1 SH99F100 控制核心

设计采用的核心控制芯片为中颖电子股份有限公司生产的SH99F100芯片,包括16位DSP和8位MCU。MCU为增强型8051,其最大工作频率为16MHz,主要处理开关量、输入输出以及通讯;DSP的最大运行速度为100MIPS,主要实现对控制算法的运算和实时保护的功能,包括6路PWM输出控制、电流和电压信号的采样以及异常信号的采集等。两个内核之间通过双口RAM以中断查询方式实现批量的数据交互,使得速度至少提高了一到两个数量级^[15]。

2.1.2 参数输入和参数显示电路

参数输入的方式有很多种,如用电位器通过A/D转换通道输入、用数字键盘通过I/O口输入、用通讯方式通过其它计算机输入等,都可以对现场设备进行

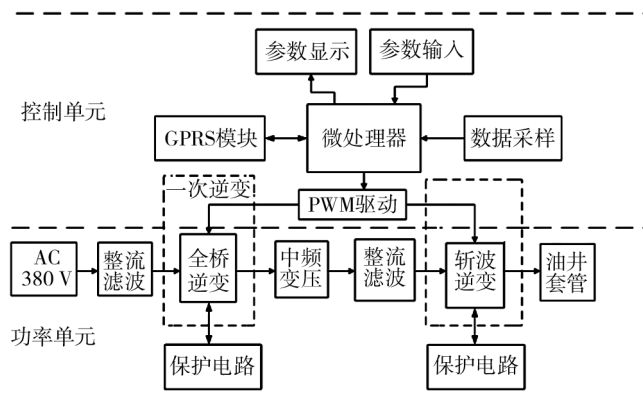


图1 脉冲电源总体结构

Fig. 1 The overall structure of pulse power supply

参数给定。本次同时采用了数字键盘输入和计算机通讯输入,使得操作人员对现场设备既可以进行现场近控也可以实现监控中心远控,参数显示采用 LCD 液晶显示与上位机监控界面相结合的方式,可以在现场与远程控制中心同时显示运行参数。

2.1.3 PWM 信号产生和驱动电路

脉冲电流阴极保护电源要求各输出参数(频率、幅值、占空比)均在一定范围内独立可调,这对控制功率开关管的 PWM 信号设计提出了较高的要求。SH99F100 自带 6 路 PWM,通过软件编程分别生成全桥逆变 PWM 控制信号和斩波逆变 PWM 控制信号,再通过驱动电路进行隔离放大,驱动 IGBT 的通断。

2.1.4 信号采集电路

设计采用霍尔传感器对输出电流、输出电压、套管的实测电位进行采集,具有响应速度快、精确度高、线性度高、体积小、长期工作稳定性高且适应各种工作环境的特点,从源头上保障了对输出电流、输出电压和套管电位采集的精确度及稳定性。

2.1.5 保护电路

保护电路主要实现对故障信号的检测及报警等功能,故障检测包括过流检测、过压检测和保护电位异常检测。当有故障发生时,电源立即停止工作,在 LCD 显示屏上显示故障信息,并且通过 GPRS 模块将故障信息传送到监控中心。

2.2 软件

控制系统的软件流程如图 3 所示。在系统上电时,首先对硬件接口电路进行初始化;然后在液晶显示屏上显示主控界面;扫描键盘是否有按键按下,若有按键按下,则利用中断进入键盘操作子程序,否则读取存储在 ROM 中的预设参数对系统输出进行控制;接下来启动数据采集单元,通过电流电压传感器对系统输出电流、电压及套管电位进行采样,并经模拟滤波及数字滤波后得到接近真实运行参数的值并传递给闭环控制算法模块;在闭环控制算法模块进行相应的运算之后,输出 PWM 信号对主功率管进行实时控制,影响套管的保护电位使其始终处于最佳范围;最后,将需要显示的参数在 LCD 上不断刷新显示,每隔一段时间将运行过程中需要记录的参数存储在只读存储器 ROM 中,并通过 RS485 通讯接口及 GPRS 无线数据传输模块发给远程监控中心。

控制算法模块作为油井套管脉冲电流阴极保护电源控制系统的核心,可以控制电源的输出参数,直

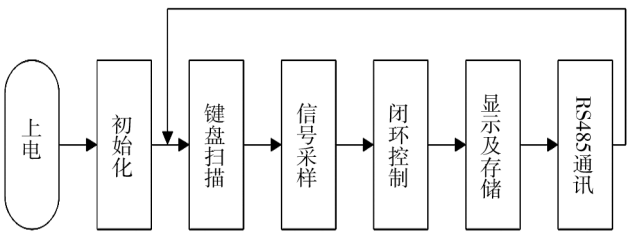


图 3 控制系统软件流程

Fig. 3 Software flow chart of the control system

接影响套管的保护电位。本设计采用三层闭环控制策略^[16],如图 4 所示,输出电流为内环,输出电压为中环,套管实测电位为外环。系统开始运行时,首先对最里层电流反馈进行算法处理,使保护电流逐渐达到设定值,并在这个过程学习最佳的频率参数匹配;当电流达到设定值时,开始进行中间层自学习控制,学习匹配最佳的幅值及基值,使得脉冲电源输出功率达到最小化,同时不改变保护电流的大小;当输出功率匹配完成后,通过改变载波占空比使被保护油井套管达到最佳保护电位进行精细调节,使套管的保护电位始终保持在最佳范围内,有效匹配电源输出功率。

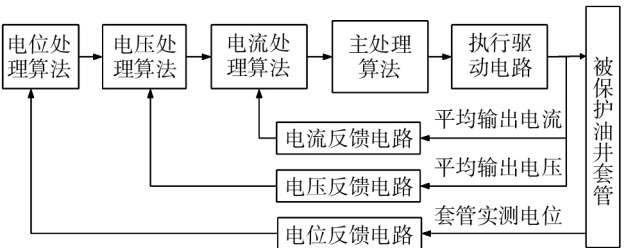


图 4 三层闭环控制策略

Fig. 4 Three-level closed-loop control strategy

3 实验及结果分析

模拟油井套管脉冲电流阴极保护系统建于 5.0 m×0.5 m×0.5 m 的水槽中,实验介质为 3% (质量分数)的 NaCl 溶液(温度为 20 ℃),阴极选用长度为 4 m 的 40 角钢,阳极选用 $\phi 6$ mm×50 mm 的石墨棒,参比电极选用 212 型饱和甘汞电极。实验前先对 40 角钢进行除锈处理,再用金刚石砂纸打磨干净后经过丙酮脱脂干燥 24 h。采用 2 台 TDS1002 示波器对脉冲电流的输出波形及角钢的保护电位响应曲线进行监测。当角钢的电位达到保护电位(-0.85 V)时,脉冲电流的波形及角钢保护电位响应曲线如图 5 和图 6 所示。从图 5 中可以看出,该控制系统能够控制电源

输出频率、幅值、占空比,且均可独立调节,可以根据实际情况实时调节脉冲电源的输出波形,匹配电源的最佳输出参数。从图6中可以看出,采用三层闭环控制策略,可以使40角钢的保护电位逐步上升至设定值,最终处于最佳保护范围。

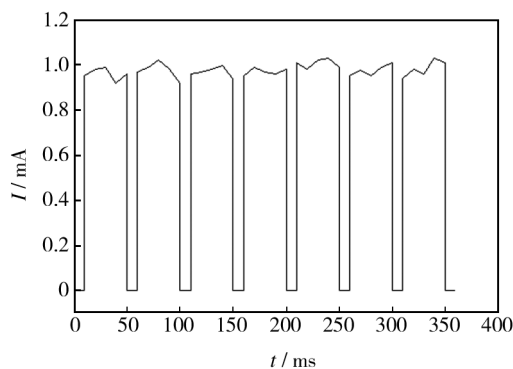


图5 脉冲电流波形

Fig. 5 Pulse current waveform

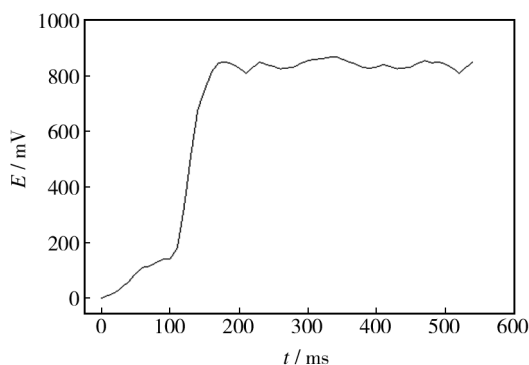


图6 保护电位响应曲线

Fig. 6 Protection potential response curve

4 结论

1) 应用此控制系统制作的脉冲电源可以生成频率、幅值、占空比均可独立调节的脉冲电流。

2) 采用三层闭环控制策略实现电源的自适应调节,使油井套管脉冲电流阴极保护电源可以自动化、智能化运行。

3) 采用GPRS无线数据传输将采集到的数据发送到远程监控中心,可以实现在远程监控中心对多个油井套管的阴极保护状况进行集中监控,对油田的数字化建设具有重要的意义。

参考文献

[1] 邱于兵,郭稚弧,林汉同,等. 脉冲电流阴极保护技术

[J]. 腐蚀科学与防护技术,2001,13(4):226—229.

QIU Yu-bing, GUO Zhi-hu, LIN Han-tong, et al. Pulsed Current Cathodic Protection Technology [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2001, 13(4): 226—229.

[2] 邱于兵,王昊,郭稚弧. 油井套管方波脉冲电流阴极保护模拟研究[J]. 油气田地面工程,2000,19(6):35—37.

QIU Yu-bing, WANG Hao, GUO Zhi-hu. Well Casing Simulation of Square Wave Pulsed Current on Cathodic Protection [J]. Oil Gas Field Surface Engineering, 2009, 19(6): 35—37.

[3] 徐兴龙,周好斌,袁森. 脉冲电流与直流电流的阴极保护效果比较研究[J]. 表面技术,2015,44(1):133—140.

XU Xing-long, ZHOU Hao-bin, YUAN Sen. Comparative Study on the Cathodic Protection Effect of Pulse Current and Direct Current [J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 133—140.

[4] 袁森,周好斌,徐兴龙. 基于C8051F020的油井套管阴极保护脉冲电源系统设计[J]. 全面腐蚀控制,2015,44(3):46—49.

YUAN Sen, ZHOU Hao-bin, XU Xing-long. The Design of Power Supply System for Oil Well Casing Cathodic Protection with Pulse Current Based on C8051F020 [J]. Total Corrosion Control, 2015, 44(3): 46—49.

[5] 胡士信. 阴极保护工程手册[M]. 北京:化学工业出版社,1999.

HU Shi-xin. Cathodic Protection Engineering Handbook [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1999.

[6] SHIRO W A, ATSUSHI K. Mixed Layer Depth Front and Subduction of Low Potential Vorticity Water in an Idealized Ocean GCM [J]. Journal of Oceanography, 2007, 63(2): 125—134.

[7] FABRIKANT V I. Resultant Forces and Moments in Mixed-mixed Problems of the Theory of Elasticity [J]. Zeitschrift Fur Angewandte Mathematik and Physik, 1999, 50(2): 948—971.

[8] NACE. Standard Recommended Practice RP0186-1994 [C]// Application of Cathodic Protection for External Surfaces of Steel Well Casing, 1994.

[9] DONIGUIAN T M. Americans Gas Operating Section Proceedings [J]. National Geographic of Arlington, 1982, 44(1): 22—33.

[10] 杨赫,刘彦礼. 近年我国油气管道防腐技术的应用[J]. 化学工程师, 2008(2): 28—31.

YANG He, LIU Yan-li. Application of Corrosion Prevention Techniques on Pipeline of Oil and Natural Gas in China in Recent Years [J]. Chemical Engineer, 2008(2): 28—31.

(下转第103页)

- TAO Zhi-hua. Adsorption Properties and Inhibition of Mild Steel Corrosion in Acid Solution by Some Phenyl-triazol Derivatives[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [12] KHALED K F, HAMMOUTI B. Some Benzotriazole Derivatives as Corrosion Inhibitors for Copper in Acidic Medium; Experimental and Quantum Chemical Molecular Dynamics Approach[J]. Materials Chemistry and Physics, 2009, 117(1): 148—155.
- [13] CAVALLARO L, FELLONI L F, TRABANELLI G, et al. The Anodic Dissolution of Iron and the Behavior of Some Corrosion Inhibitors Investigated by the Potentiodynamic Method[J]. Electrochimica Acta, 1964, 9(5): 485—494.
- [14] FERREIRA E S, GIACOMELLI C, GIACOMELLI F C. Evaluation of the Inhibitor Effect of Lascorbic Acid on the Corrosion of Mild Steel[J]. Materials Chemistry and Physics, 2004, 83(1): 129—134.
- [15] LI X, DENG S, FU H. Benzyl Trimethyl Ammonium Iodide as a Corrosion Inhibitor for Steel in Phosphoric Acid Produced by Dihydrate Wet Method Process[J]. Corrosion Science, 2011, 53(2): 664—670.
- [16] BENTISS F, LEBRINI M, LAGRENEE M. Thermodynamic Characterization of Metal Dissolution and Inhibitor Adsorption Processes in Mild Steel/2,5-bis (n-thienyl)-1,3,4-thiadiazoles/Hydrochloric Acid System[J]. Corrosion Science, 2005, 47(12): 2915—2931.
- [17] 李敏娅, 王海人, 屈钧娥. 430 不锈钢表面 PFDS 硅烷膜的自组装及缓蚀性能研究[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 66—69.
- LI Min-ya, WANG Hai-ren, QU Jun-e. Self-assembling of PFDS on the Surface of 430 Stainless Steel and Its Corrosion Inhibition Performance[J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 66—69.
- [18] SINAPI F, FORGET L, DELHALLE J, et al. Self-assembly of (3-mercaptopropyl) Trimethoxysilane on Polycrystalline Zinc Substrates towards Corrosion Protection[J]. Thin Solid Films, 2002, 405(112): 186—193.

(上接第 90 页)

- [11] 袁森, 周好斌, 徐伟东. 智能化油井套管脉冲电源系统设计[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2015, 32(1): 8—12.
- YUAN Sen, ZHOU Hao-bin, XU Wei-dong. The Design of Intelligent Power Supply System for Oil Well Casing Cathodic Protection with Pulse Current[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2015, 32(1): 8—12.
- [12] 袁森, 周好斌, 徐兴龙. 油井套管脉冲电流阴极保护监控系统设计[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 133—137.
- YUAN Sen, ZHOU Hao-bin, XU Xing-long. Design of Pulse Current Cathodic Protection Monitoring System for Oil Well Casing[J]. Surface Technology, 2015, 44(3): 133—137.
- [13] 夏泽中, 刘婷. 阴极保护电源远程监控系统设计与实现[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(1): 4—8.
- XIA Ze-zhong, LIU Ting. Design and Realization of Remote Monitoring of Cathodic Power Supply System[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(1): 4—8.
- [14] 增敏, 陈小红, 曹彪, 等. 一种微弧氧化逆变焊接电源控制制系统[J]. 华南理工大学学报, 2012, 34(1): 4—7.
- ZENG Min, CHEN Xiao-hong, CAO Biao, et al. Control System of Micro-arc Oxidation Inverter Power Supply[J]. Journal of South China University of Technology, 2009, 37(2): 40—43.
- [15] 杨骏. 基于中颖双核芯片 SH99F100 在无卡旋切机变频器中的应用[J]. 变频器世界, 2012: 85—87.
- YANG Jun. Application of SH99F100 Dual-core Chips with Sinowalth in Non-center Rotary Cutter Inverter[J]. The World of Inverters, 2012: 85—87.
- [16] 马菊莲, 马军鹏, 周好斌. 具有自学习功能的智能抽油机变频控制系统研究[J]. 钻采工艺, 2010, 33(4): 77—79.
- MA Ju-lian, MA Jun-peng, ZHOU Hao-bin. Study on Variable Frequency Control System of Smart Pumping Unit With The Function of Self-learning[J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(4): 77—79.

(上接第 96 页)

- [19] JACKSON R D, TOYLOR M P, EVANS H E, et al. Oxidation Study of an EB-PVD MCrAlY Thermal Barrier Coating System[J]. Oxidation of Metals, 2011, 76(3/4): 259—271.
- [20] HILLE T S, TURTELTAUB S, SUIKER A S J. Oxide Growth and Damage Evolution in Thermal Barrier Coatings[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(10): 2139—2152.
- [21] KORB L J, OLSON D L. Metals Handbook[M]. USA: ASM International, 1987.
- [22] 韩志勇, 王晓梅, 王志平. 热障涂层高温 TGO 生长变化[J]. 焊接学报, 2014, 35(11): 5—8.
- HAN Zhi-yong, WANG Xiao-mei, WANG Zhi-ping. Change of TGO Growth in Thermal Barrier Coatings at High Temperature[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(11): 5—8.