

深井电脉冲压裂装置研制

徐旭哲^{1,2}, 孙鹤鸿^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室, 北京 100190)

摘要:研制了一种用于油气藏增产增注的深井电脉冲压裂装置。装置通过馈电电缆下放至 2 000 m 到 3 000 米 m 的深井中进行工作。考虑到馈电电缆耐压和分布参数的影响, 高压充电电源采用两级升压, 工作频率为 1 kHz; 储能元件采用同轴型高储能密度脉冲电容器总储能为 5 kJ(25 kV)。通过测试得到工作电压 22 kV 时放电电流约为 30 kA。初步实验表明, 研制的深井电脉冲压裂装置在额定电压下可以连续稳定工作 2 000 次以上。

关键词:电脉冲压裂; 水中放电; 油气藏增产

Design of Electric Pulse Fracturing Device in Deep Well

XU Xuzhe^{1,2}, SUN Yaohong^{1,2}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, a new type of electric pulse punching device for increasing the injection of oil and gas in deep wells is developed. The device is carried out by feeding cable in a deep well of 2 000 m to 3 000 m. Considering the influence of the voltage and the distribution parameters of the feed cable, the high voltage charging power supply adopts the two stage boost mode whose working frequency is 1 kHz. A high energy storage density pulse capacitor with a total storage capacity of 5 kJ(25 kV) is used as the energy storage element. The discharge current under the condition of 22 kV is obtained by the test, and the discharge current was about 30 kA. The preliminary experiment shows that the electric pulse punching device for deep wells can be continuously and stably for more than 2 000 times under the rated voltage condition.

Keywords: electric pulse; discharge in water; oil-gas reservoir stimulation

在传统的油气藏增产技术领域, 水力压裂技术作为一种重要的油气增产措施在国内外被广泛的应用。但是其需要消耗大量的水资源, 同时注入的化学液体(压裂液)容易造成储层伤害, 不利于油气增产。电脉冲压裂技术是一种低能耗、低伤害的新型油气藏增产技术手段, 具有良好的应用前景。高压电脉冲压裂技术以“液电”效应理论为基础, 在有限空间内的流体介质中产生放电, 电弧高温引起通道内压力升高, 形成冲击波, 产生的压力幅值可

达几十甚至是几百 MPa。

因钻井钻孔的尺寸、井下高压高温环境和井用电缆规格等因素的限制, 井下电脉冲压裂装置的设计受到很多条件的约束。国内在相关领域的研究单位很少。中国科学院电工研究所是国内早期开展电脉冲压裂实验研究的单位之一, 目前实验室用电脉冲压裂装置储能可以达到 100 kJ。

1 深井电脉冲压裂装置简介

井下电脉冲压裂装置包括地面控制系统、深井传输电缆、高压充电单元、储能装置、放电开关和换能器等部分, 如图 1 所示, 其中, 地面控制系统是在

收稿日期: 2015-12-10; 修回日期: 2016-04-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577176)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51577176)

地面工作,高压充电单元、储能装置、放电开关和换能器在深井下工作。

井下电脉冲压裂装置基本参数如下:最高储能 5 kJ;放电电压 25 kV;放电电流 ≥ 30 kA;装置尺寸直径 102 mm,长度 < 7 m;放电次数 3 次/min。

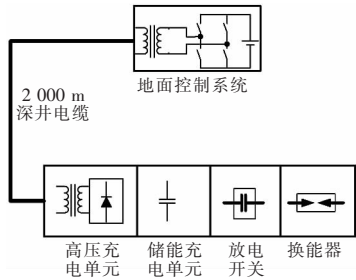


图 1 深井下电脉冲压裂装置原理框图

Fig.1 Block diagram of the electrical pulse fracturing apparatus under deep well

图 1 中,高压充电单元由初级并联、次级整流后再串联的 6 组升压变压器组成;储能装置采用电容储能方式,选用同轴结构的金属化薄膜电容器 4 只($4 \times 4 \mu\text{F}$)并联。金属化薄膜电容器的特点是有很强的自愈能力,储能密度高,非常适合脉冲放电应用。其单个电容器额定工作电压 25 kV,外径 85 mm,长度 1.1 m。并用馈电电缆耐压小于 1 000 V,为了减小深井电缆自身的热损耗,需要尽量提高传输电压。所以地面控制系统设计输出电压为交流 600 V、1 kHz 的方波电压输出形式;地面控制系统采用 PWM 调制方式的逆变电源方案,通过调节占空比,可以调节高压充电电源充电时间。

在数千米深井下,电容器的充电电压不易精确测量和采集。同时过长的传输电缆也不容易传递电压幅值较小的控制信号。为了提高整个装置的可靠性,放电开关采用空气间隙的双电极自触发开关设计。放电电压的阈值通过调节放电电极的极间距离进行调节,触发电压可在 18~25 kV 之间人为设定。换能器采用传统的同轴对极放电电极。

2 高压充电回路设计与实验

高压充电回路如图 2 所示,市电经整流后形成 300 V 左右的直流电压,经全桥式逆变电路和变比

为 1:2 的升压变压器 T_1 ,产生频率为 1 kHz、幅值为 600 V 左右的交流方波,由数千米左右的深井电缆传递至井下高压升压变压器 T_2 的输入端。高压中频变压器 T_2 的等效变比为 1:60,升压后经整流电路给储能电容器充电。充电电源为典型的开环控制的电压源,在储能电容前端串有限流电阻 R_2 ,防止电容器充电初期充电电流过大。

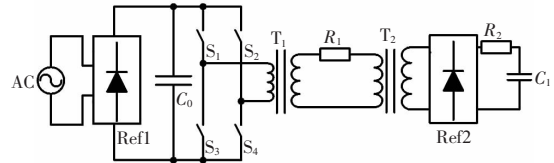


图 2 高压充电回路原理

Fig.2 Schematic of high voltage charging circuit

图 2 中, R_1 是深井馈电电缆的等效电阻。深井馈电电缆采用的是 W7BP 型号的测井电缆,电缆电阻为 $32 \Omega/\text{km}$,采用三芯并联,则电阻为 $10 \Omega/\text{km}$ 。整个回路长度为 6~7 km (按下井深度 3 000 m 计算),电缆电阻为 70Ω 左右。 R_2 是高压测的限流电阻,阻值为 $7.5 \text{ k}\Omega$,由 4 根 $30 \text{ k}\Omega/100 \text{ W}$ 的高压电阻并联而成。当储能电容 C_1 短路放电时,在 C_1 上产生一定幅值的反向电压,而储能电容反充的能量会通过整流桥 Ref2 释放,反向电流被 R_2 限制在 5 A 以内,整流桥 Ref2 得到保护。

高压充电回路的充电电流和充电时间决定了电脉冲压裂装置的平均功率。高压充电电源采用电压源方案,充电电流指数上升,其充电等效电路如图 3 所示。图中 U_1 为等效直流电压, R_c 为等效限流电阻,包括深井电缆电阻 R_1 ,高压回路限流电阻等效到原边 R'_2 ,高压变压器副边线圈电阻等效到原边 R'_{coil} 。

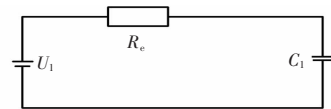


图 3 充电等效电路

Fig.3 Charging equivalent circuit

占空比设为 D ,设定适当的充电时间,将有利于升压变压器 T_1 、高压变压器 T_2 、限流电阻 R_2 的功率设计。充电时间常数 $\tau = R_c C_1$,则充电电路的电路

方程为

$$U_1 = R_c I + \frac{1}{C_1} \int I dt \quad (1)$$

$$U'_c = U_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (2)$$

$$t = -R_c C_1 \ln \left(1 - \frac{U'_c}{U_1} \right) \quad (3)$$

$$t' = \frac{t}{D} \quad (4)$$

式中: U_1 为升压变压器副边电压; D 为占空比; R_c 为等效充电电阻, 包括 R_1 、 R_2 , 等效到原边的 R'_2 和高压变压器副边线圈电阻等效到原边 R'_{coil} ; U'_c 为电容电压反射到高压变压器原边的电压, 等于电容器 C_1 充电电压除以高压变压器变比; C_1 为等效到高压变压器原边的储能电容, 等效到高压变压器原边等于电容乘上变比的平方; t 为等效的充电时间; t' 为实际的充电时间。

实验测试中, 预估 $R'_2 = 5 \Omega$ 。用 100Ω 的线绕电阻模拟 2 000 m 的深井电缆的等效电阻。则 $R_c = 110 \Omega$ 。调制脉宽为 208 μs , 开关频率为 1 kHz, 占空比 D 为 0.41。

当充电电压为 22 kV 时, 等效到原边的电压为 366 V, 储能电容器折算到高压变压器原边的 C_1 为 0.057 6 F, 则计算的充电时间为

$$t' = \frac{-105 \times 0.0576 \ln \left(1 - \frac{366}{600} \right)}{0.41} = 14.55 \text{ s}$$

如图 4 所示为充电时间为 16 s, 高压变压器的原边输入电压、电流波形。计算的充电时间和实际充电时间稍有不同, 主要原因是等效电阻值的估算和实际的等效电阻存在一定的偏差。

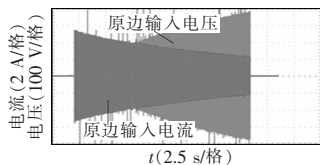


图 4 充电波形

Fig.4 Waveforms of charging

3 高压变压器设计

高压变压器的温升控制在 70 $^{\circ}C$ 以内, 工作频

率为 1 kHz。高压变压器由 6 组小升压变压器组成, 原边并联, 副边经整流后串联, 如图 5 所示。电脉冲高压裂装置工作频率最低为 20 s/次。实际按 15 s 放电一次计算各个系统元器件的功率容量。整个系统能量为 5 000 J, 则高压充电电源的充电速率为 333 J/s。考虑到充电电源采用电压源方案, 充电电流呈指数形式下降, 充电初期的峰值功率非常大。变压器至少需要按 1 kW 的功率容量设计。

高压变压器采用型号为 ED25 \times 25 \times 50 的厚 0.1 mm 的硅钢片铁芯, 初级绕制 250 匝, 次级绕制 2 500 匝。整流桥采用 10 kV/0.3 A 硅堆组合而成, 环氧浇注。

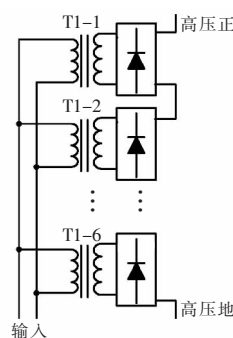


图 5 高压变压器电路

Fig.5 Circuit of high voltage transformer

4 高压放电回路设计和实验

高压储能电容的大部分能量经过高压放电开关, 放电换能器传送给水介质, 在水介质中放电电弧能量产生高温气体和高温等离子体, 迅速膨胀。产生强大的冲击波能量扩散到周围岩体。当放电发生在有限空间内时, 由于井壁的限制, 通常不会形成气泡脉冲。同样条件下, 井筒直径越小, 产生的压力越高。当放电产生的压力大于材料(岩石等)的抗压强度时, 材料便会产生裂纹并破碎。冲击波压力的大小与放电能量成正比, 与放电能量持续时间成反比。在实际设计中, 放电回路应尽量短, 减少分布电感, 降低放电周期。

如图 6 所示为放电电流和储能电容器形成反压, 通过整流桥释放的反向电流波形。采用罗氏线圈测量, 变比为 12 kA/V。由图可见, 当放电电压为

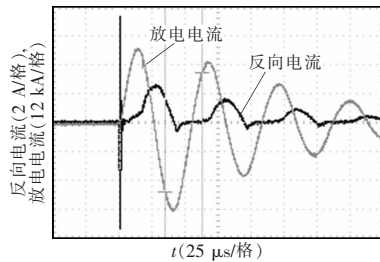


图 6 放电电流波形

Fig.6 Waveforms of discharge current

22 kV, 峰值放电电流为 30 kA; 反向电流峰值接近 2.5 A。

高压开关采用圆盘式空气隙开关, 其外形结构如图 7 所示, 放电电压阈值通过间隙距离调节。放电换能器采用对电极式放电电极, 如图 8 所示。圆盘式空气隙放电开关内部由两个圆形平面的铜柱电极构成, 电极的直径为 $\Phi 20$ mm, 间距为 5~8 mm。通过气隙的调整, 可以调节放电电压。随着放电次数的增加, 放电开关会被气体放电游离出的碳污染, 逐渐降低放电电压, 此时就需要更换新的放电开关。



图 7 放电开关结构设计

Fig.7 Structure design of discharge switch



图 8 同轴对极式换能器

Fig.8 Coaxial counter electrode transducers

5 结语

深井中的电脉冲压裂装置与普通的高压放电电源的设计有很大的差别, 工作空间狭小, 工作温度较高。采用同轴型的高压金属化薄膜电容器可以很好地适应井下金属筒结构; 高压变压器采用原边并联, 副边整流后串联的方案也可以大大减小变压

器和整流器的尺寸, 更好地适应深井要求。采用自触发的放电开关, 可以连续工作 2 000 次以上, 可以很好地满足下井 1~2 次的应用需求。

另外, 深井电缆在高压电源的设计中应该着重考虑, 深井电缆的电阻、电容、电感对高频高压电源的设计产生重要的影响。电缆的容性电流会增加地面控制系统的无功功率输出, 电缆的电感会在高频时产生压降, 影响高压变压器的输出电压。

参考文献:

- [1] 张晓明, 刘斌, 沈田丹, 等. 电爆震解堵技术在低渗透油田的应用评价[J]. 钻采工艺, 2010, 33(6):68-70.
Zhang Xiaoming, Liu Bin, Shen Tiandan, et al. Application of the electric detonation broken down technology in low-permeability oil field[J]. Drilling & Production Technology, 2010, 33(6):68-70(in Chinese).
- [2] 陆小兵, 王守虎, 隋蕾, 等. 电脉冲解堵增注机理分析及应用[J]. 天然气与石油, 2011, 29(6):61-62.
Lu Xiaobing, Wang Shouhu, Sui Lei, et al. Analysis and application of electronic pulse de-plugging and injection adding mechanism [J]. Natural Gas & Oil, 2011, 29(6):61-62(in Chinese).
- [3] 孙鹤鸿, 左公宁. 传输式电火花震源在油井解堵中的应用[J]. 高电压技术, 2000, 26(4):31-32.
Sun Yaohong, Zuo Gongning. The transferring spark source used in dredging oil well [J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(4):31-32(in Chinese).
- [4] 孙鹤鸿, 孙广生, 严萍, 等. 高压电脉冲采油技术发展[J]. 高电压技术, 2002, 28(1):41-42.
Sun Yaohong, Sun Guangsheng, Yan Ping, et al. The development of the electric pulse oil-mining technology [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(1):41-42(in Chinese).
- [5] 孙鹤鸿, 左公宁, 姚儒彬, 等. 一种用于油水井解堵增油的高压脉冲电源[J]. 钻采工艺, 2000, 23(5):45-47.
Sun Yaohong, Zuo Gongning, Yao Rubin, et al. High voltage electrical pulse power supply used for dredging oil & water wells [J]. Drilling & Production Technology, 2000, 23(5):45-47(in Chinese).
- [6] 韩旻, 韩波, 王新新, 等. 脉冲大电流放电技术在疏通油井上的应用[J]. 电工电能新技术, 1998, 17(1):36-40.

- aged models for a 401-level MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3):1501-1508.
- [8] Gowaid I A, Adam G P, Massoud A M, et al. Quasi two-level operation of modular multilevel converter for use in a high-power DC transformer with DC fault isolation capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1):108-123.
- [9] Luth T, Merlin M M C, Green T C, et al. High-frequency operation of a DC/AC/DC system for HVDC applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8):4107-4115.
- [10] Kish G J, Ranjram M, Lehn P W. A modular multilevel DC/DC converter with fault blocking capability for HVDC interconnects[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 148-162.
- [11] Mei Jun, Xiao Bailu, Shen Ke, et al. Modular multilevel inverter with new modulation method and its application to photovoltaic grid-connected generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1):5063-5073.
- [12] Antonopoulos A, Angquist L, Norrga S, et al. Modular multilevel converter AC motor drives with constant torque from zero to nominal speed[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(3):1982-1993.
- [13] Hagiwara M, Nishimura K, Akagi H. A medium-voltage motor drive with a modular multilevel PWM inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(7):1786-1799.
- [14] Vasiladiotis M, Cherix N, Rufer A. Accurate capacitor voltage ripple estimation and current control considerations for grid-connected modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9):4568-4579.



王倩楠

作者简介:

王倩楠(1993-),女,通信作者,硕士研究生,研究方向:模块化多电平换流器及直流输电,E-mail:wclwycn@126.com。

杨荣峰(1978-),男,博士,讲师,研究方向:交流电机控制技术,E-mail:yrf@hit.edu.cn。

刘瑜超(1989-),女,博士研究生,研究方向:多端柔性直流输电,E-mail:512144420@qq.com。

徐殿国(1960-),男,博士,教授,研究方向:电力电子及多端直流输电技术,E-mail:xudiang@hit.edu.cn。

(上接第 168 页)

- Han Min, Han Bo, Wang Xinxin, et al. Applications of impulse discharge with high current technique on oil plug-releasing [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1998, 17(1):36-40(in Chinese).
- [7] 孙凤举, 曾正中, 邱毓昌, 等. 一种用于油水井解堵的脉冲大电流源[J]. 高电压技术, 1999, 25(2):47-49.
- Sun Fengju, Zeng Zhengzhong, Qiu Yuchang, et al. Pulse high current power supply used for dredging oil & water wells[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(2):47-49 (in

Chinese).



徐旭哲

作者简介:

徐旭哲(1979-),男,硕士,工程师,研究方向:脉冲功率技术,E-mail:xz xu@mail.iee.ac.cn。

孙鹤鸿(1968-),男,通信作者,研究员,博士生导师,研究方向:脉冲功率技术,E-mail:yhsun@mail.iee.ac.cn。