

基于超级电容器储能的修井机供电策略研究

超级电容作为一种新兴的储能元件，在电力系统中的应用越来越广泛。相比于普通电容和蓄电池等储能元件，超高的能量密度和充放电次数使其在储能方面拥有巨大的优势。传统的油田修井作业流程，不同的作业时段负荷变动幅度大，因此需接入高压箱式变压器。高压箱式变压器的接入一方面使得作业安全隐患增加；另一方面，高压箱式变压器使得设备复杂化，降低了修井系统的灵活性。基于修井作业的原理以及超级电容充放电控制技术，设计了基于超级电容储能的油田修井作业供电系统，并且在Matlab/Simulink下进行了系统建模仿真。通过仿真分析，验证了基于超级电容储能修井机供电策略解决冲击负荷问题的有效性。

康忠健 李 鑫/中国石油大学（华东）电气工程系

0 引言

油田修井作业中，油田井场变压器的容量一般较小，只有30~50 kW。而网电修井机正常工作情况下，所需功率为90~110 kW。因此，网电修井作业时，一般自备大容量箱式变压器，采用这种供电方式既增加了设备复杂程度，又增加了安全隐患^[1]。

针对修井作业的电源功率不足问题，文献[2]提出了一种电容器储存抽油机下放势能的方法，将抽油机下放势能通过电力装置转化为电能储存在电容器里面，当功率不足时，通过电容器放能来弥补修井作业功率不足的问题，并投入了实际应用。这种方法虽然可行，但是电路设计相对复杂，能量储存过程实现难度较大，因此储能装置用于修井作业仍然不失为一种有效的方法。

超级电容器自问世以来，因其具有寿命长、功率密度大等特点，能够满足

电动汽车、电子存储设备、家用电器和航天航空设备等一些应用领域对高功率储能装置的需求。其应用急速扩展，逐步取代原有的蓄电池等储能装置，在电动汽车的电源系统设计中，超级电容器的应用尤为普遍^[3]。

文献[4-5]提出了基于超级电容储能的修井作业功率补偿方法，分析了修井作业中引入超级电容储能带来的优势，通过实际应用和效果分析，证明了超级电容能有效提高修井机电源利用效率和修井工作效率，解决了修井作业中油田变压器功率不足的问题。

基于上述内容，本文在Matlab/Simulink下设计并搭建了基于超级电容储能的修井机供电系统模型，进行了油田修井作业流程仿真分析。通过分析仿真结果，验证了基于超级电容储能的修井机供电策略的有效性。

1 油田修井作业流程

油田进行修井作业时，井内连接的油杆较长，需要分段进行卸载，每卸载一段油杆的过程看作一个修井作业周期。每个修井作业周期，划分为几个工作阶段，不同的工作阶段，工作的电动机不同。每一个阶段，各种电动机相互协调工作，来保证修井作业的正常进行^[6]。

以下对油田修井作业流程进行简化，只针对修井作业中功率水平高且比较重要的电动机（卸扣电动机和绞车电动机）说明修井作业流程，作业流程如图1所示。



康忠健/教授

关键词/Keywords

超级电容·
修井作业·
储能·

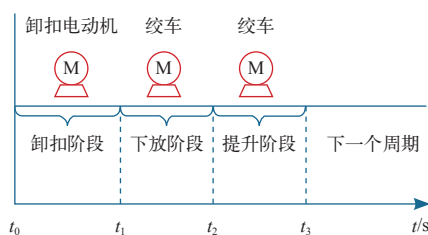


图1 修井作业流程

卸扣过程是对联锁的油杆进行解扣，卸扣电动机以额定功率运行，绞车空载运行，此时变压器功率仍有剩余。

下放过程，绞车以短周期间歇运行，点动下放油杆，卸扣电动机空载运行，此时绞车工作功率大于变压器额定功率，变压器功率不足。

提升阶段，此阶段是将下一段油杆提出井口，此过程中绞车运行，卸扣电动机空载运行，变压器功率不足。

因此，在变压器功率不足时，电动机负载不能正常运行，必须采取合适的措施补偿变压器功率，维持修井作业正常进行。

2 基于超级电容器储能的修井机电源系统设计

2.1 超级电容组及其容量选取

超级电容组作为储能装置时，在一个工作周期内，其释放的能量应该等于负载功率的消耗，即满足能量守恒关系，即

$$\frac{1}{2}C(U_{\max}^2 - U_{\min}^2) \geq P_s t \quad (1)$$

式中， $U_{\max}$ 为超级电容组最大工作电压； $U_{\min}$ 为最小工作电压； P_s 为冲击负荷下的功率缺额。

超级电容组放电阶段是提升阶段和下放阶段，但是主要消耗的功率在提升阶段。如果提升时间 $t = 10$ s，绞车额定功率为110 kW，变压器功率为50 kW，理论上绞车工作时功率缺额为60 kW。考虑其他电动机的空载损耗和电路存在的损耗，在设计中补偿功率取71 kW，代入式(1)，得超级电容的容量 $C = 19.09$ F。最终设定超级电容组容量值 $C = 20$ F。

至此，油田修井系统参数如表1所示。

表1 修井机系统参数表

油田修井系统设备及参数	参数值
修井机系统电压/V	400
油田变压器规格/(kW/kV/kHz)	50/6/0.4
卸扣电机规格/(kW/kV/Hz)	22/0.4/50
绞车电机规格/(kW/kV/Hz)	110/0.4/3
超级电容组工作电压/V	420~500
提升阶段时间/s	10
卸扣阶段时间/s	15
下放阶段时间/s	4×10
超级电容组容量/F	20

2.2 超级电容组充放电电路及充电电流计算

2.2.1 双向DC-DC电路及原理

超级电容组充放电电路选择DC-DC电路，超级电容组经过DC-DC变换器和绞车变频器的直流母线相连接，DC-DC变换器电路图如图2所示。

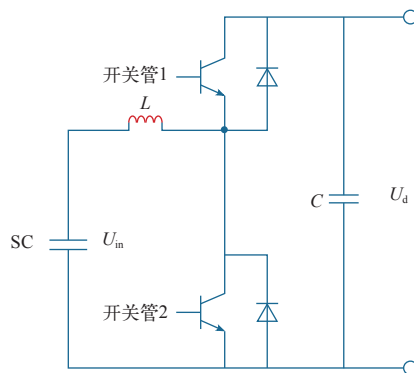


图2 双向DC-DC变换器结构图

2.2.2 超级电容组充电电流设计

在超级电容组进行充电时，充电电流的设计要依据变压器剩余功率来选取。修井作业是分阶段的，不同时段变压器剩余功率不同。在卸扣阶段，卸扣电动机以额定功率运行，此时变压器剩余功率约为28 kW，直流母线带负载之后的实际电压在520~530 V之间，在卸扣阶段，超级电容组最大充电电流计算公式为

$$I_{\max 1} = \frac{P_{r1}}{V_{\text{bus}}} \approx 53.85 \text{ A} \quad (2)$$

在卸扣电动机和绞车均没有运行时，变压器剩余功率约为额定功率，此时超级电容组最大充电电流计算公式为

$$I_{\max 2} = \frac{P_{r2}}{V_{\text{bus}}} \approx 96.15 \text{ A} \quad (3)$$

式中, P_{r1} , P_{r2} 为变压器在两个时段的剩余功率; V_{bus} 为绞车变频器直流母线工作电压。

假设修井机从卸扣阶段开始运行, 超级电容组初始电压为420 V, 在提升油杆前, 为使电容充电达到最大电压值500 V, 应该满足式(4), 即

$$\frac{i_1 t_1 + i_2 t_2 - i_3 t_3}{C} = \Delta U_c = 80 \text{ V} \quad (4)$$

式中, i_1 为卸扣阶段内的充电电流; i_2 为点动下放阶段内的充电电流; i_3 为点动下放阶段的平均放电电流, 超级电容放电时电流是变化的, 可取放电初始电流和放电末电流的平均值; t_1 、 t_2 和 t_3 分别为三个阶段的时间。

为满足变压器不过载并且最终超级电容电压能达到500 V, 同时满足式(2)、式(3)和式(4), i_1 、 i_2 分别取46 A和86 A。

3 超级电容充放电电路控制器设计

3.1 Buck模式控制器设计

Buck模式即超级电容充电模式, 采用恒电流充电控制, 控制的关键在于双向DC电路的控制。在DC-DC变换器的控制器设计中, 最常用的分析方法是小信号模型分析法^[7-9]。

Buck电路工作时, 有两种工作模式, 电感电流断续模式和电感电流连续模式^[10-12]。在两种工作状态下, 小信号模型的分析方法相同, 但是分析结果却有差异。超级电容组充电时采用电流连续模式充电, 下面对电流连续的Buck电路作小信号模型分析。

依据状态平均法, 对Buck电路在稳态运行点做扰动, 得到Buck电路小信号模型电路如图3所示。

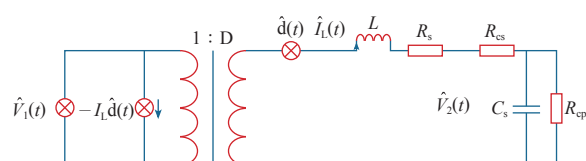


图3 Buck电路小信号模型

控制器设计如下。

通过对开关电路进行小信号模型分析, 由于电容的并联电阻很大, 电感电流到开关信号占空比传递函数可以近似写为

$$G_{\text{id1}}(s) = \frac{V_1 C_s s}{C_s L s^2 + (R_s + R_{cs}) C_s s + 1} \quad (5)$$

式中, V_1 为输入侧电压; C_s 为超级电容组容量; L 为Buck电路电感值; R_s 为电感等效电阻; R_{cs} 为超级电容组等效串联电阻。

DC-DC变换器工作于Buck模式时的电路参数如表2所示。

表2 充电电路参数表

电路参数	参数值
V_1/V	520
L/mH	20
C_s/F	20
$R_s/\text{m}\Omega$	2
$R_{cs}/\text{m}\Omega$	1

将表2数据带入式(5)得

$$G_{\text{id1}}(s) = \frac{10400s}{0.4s^2 + 0.04C_s s + 1} \quad (6)$$

电流反馈加入滤波环节, 设滤波环节为一阶惯性环节, 如式(7)所示。

$$RC(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2\pi f_c}} \quad (7)$$

式中, 取截止频率 $f_c = 2 \text{ kHz}$ 。

开关管占空比到误差传递函数计算公式为

$$G_{\text{de}}(s) = \frac{1}{V_M} \quad (8)$$

式中, V_M 为三角波最大值, 其值为1。

取电流采样系数 $K_{s1} = 1/100$, 比例积分控制器设计为 $K_{p1} = 800$, $K_{i1} = 100$, 开环传递函数计算公式为

$$G_1(s) = K_{i1} G_{p1}(s) G_{\text{de}}(s) G_{\text{id1}}(s) RC(s) \quad (9)$$

其开环传递函数波特图如图4所示。

从图4可以看出, 幅频特性和相频特性均满足稳定性要求, 系统闭环稳定。

3.2 Boost模式控制器设计

Boost模式下, 超级电容组通过DC-DC变换

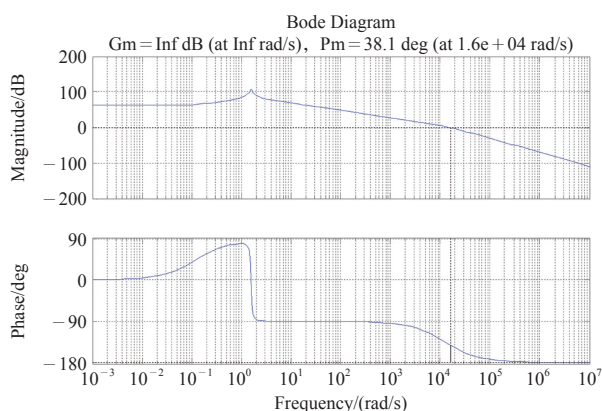


图4 充电模式电流环开环传递函数波特图

器向绞车变频器直流母线放电, 和变压器一同为绞车供电。采用恒功率控制, 通过给定功率和超级电容电压相除得到电感电流参考值, 从而控制电感电流的大小, 实现恒功率输出^[13-15]。这种恒功率控制实质上仍然是电感电流负反馈, 只是电流参考值是不断变化的。

类似于Buck电路的推导方法, 在Boost电路下, 电流到开关信号占空比传递函数计算公式为

$$G_{id2}(s) = \frac{\hat{I}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_1 R_0 C_0 s + V_1 - R_0 D I_L}{R_0 C_0 L s^2 + (R_m R_0 C_0 + L)s + R_m + R_0 D^2} \quad (10)$$

式中, R_0 为输出电阻; C_0 为输出滤波电容; R_m 为等效输出电阻; D 为开关器件占空比; 其他参数与充电模式下的电路参数相同。

Boost模式下电路参数如表3所示。

表3 Boost模式电路参数

电路参数	参数值
V_1/V	520
L/mH	20
C_0/F	0.1
$R_0/m\Omega$	3.8
$R_m/m\Omega$	1

DC电路占空比取超级电容组在最小工作电压时的值, 将表3数据带入式(10)得^[16]

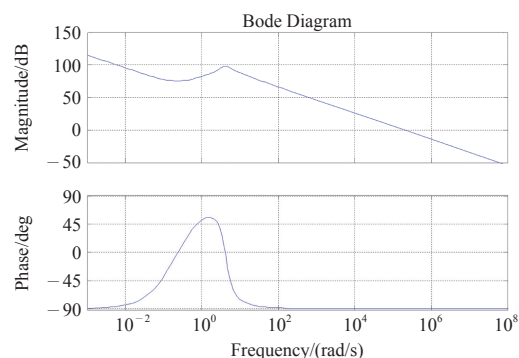
$$G_{id2}(s) = \frac{988s + 404.48}{0.0076s^2 + 0.0204s + 0.1382} \quad (11)$$

设置电流采样系数 $K_{s2} = 1/500$, 比例积分控制器参数 $K_{p2} = 800$, $K_{i2} = 100$, 电流环开环传递函数

计算公式为

$$G_2(s) = K_{i2} G_{pi2}(s) G_{de}(s) G_{id2}(s) RC(s) \quad (12)$$

由于放电模式下, 电流环传递函数与占空比有关, 因此, 不同的时段传递函数不同。但是在 $G_{id2}(s)$ 中, 分母项中占空比的影响较小, 可以忽略; 分子项中, 电感电流的变化和占空比的变化范围相对不大, 因此可用放电过程中某一点的传递函数来代替放电过程的传递函数。这里用放电过程末的传递函数来表征系统开环传递函数, 开环传递函数波特图如图5所示。


 图5 放电模式电流环开环传递函数波特图 ($U_0 = 420 V$)

由图5可以看出, 在设计控制参数下, 幅频特性和相频特性均满足稳定性要求, 系统闭环稳定。

4 基于超级电容储能的修井机供电系统仿真分析

4.1 基于超级电容储能的修井机系统模型

在Matlab/Simulink中设计的基于超级电容储能的修井作业系统模型如图6所示。

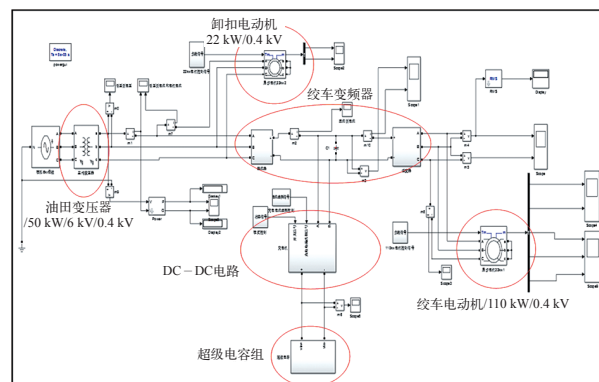


图6 Simulink修井机系统模型

修井作业系统模型中, 6 kV母线用三相交流电压源代替, 油田变压器所带负荷为卸扣电动机和绞车变频器。超级电容组经过DC-DC双向电路接于绞车变频器直流母线, 通过DC-DC变换器, 超级电容组和直流母线进行能量交换。

4.2 仿真结果分析

仿真设置中, 一个修井周期设置为75 s, 自卸扣阶段开始, 卸扣阶段时间为15 s, 然后停5 s, 开始点动下放阶段。点动下放阶段绞车间歇运行周期为10 s, 7 s下放, 3 s停歇, 共40 s, 对应4个小周期。最后是油杆提升阶段, 时间10 s。一个修井作业周期内的超级电容电压电流、变压器低压侧电流和变频器直流母线电压仿真波形如图7所示。

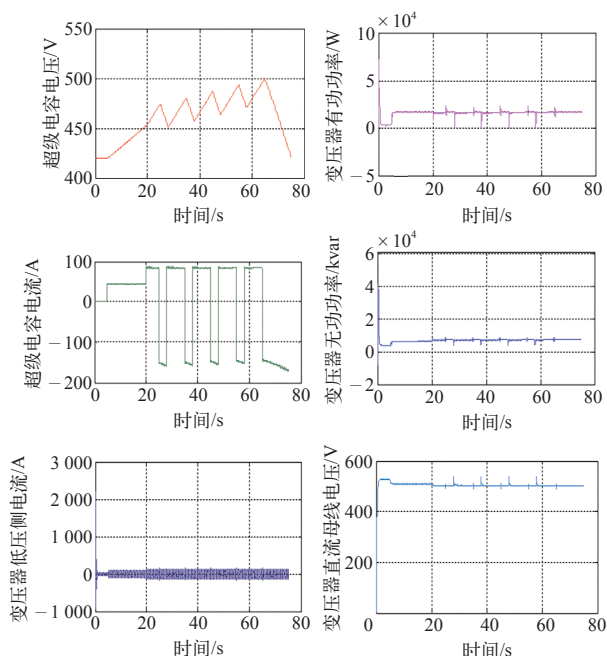


图7 仿真波形

卸扣阶段开始, 超级电容开始以恒电流充电, 充电电流为46 A, 初始电压为最小工作电压420 V, 卸扣阶段结束, 电压到达455 V, 之后停歇5 s时, 超级电容组继续恒电流充电, 电流值为86 A, 至点动下放前, 其电压到达476 V。

点动下放开始, 超级电容组以小周期充放电交替进行, 充电过程以86 A恒电流充电, 放电时以71 kW恒功率放电, 但是由于充电时间大于放电时间, 且充电电流大于平均放电电流, 点动下放阶段结

束, 最终电容电压值到达500 V, 进入提升阶段。

提升阶段开始, 超级电容组以71 kW恒功率放电10 s, 最终超级电容组电压降到420 V左右, 提升阶段结束, 一个修井作业周期完成。

一个作业周期内, 由于超级电容组的能量补偿作用, 在冲击负荷投入时, 变压器电流能马上消除波动, 基本维持恒定, 变压器功率维持在额定功率50 kW左右, 绞车变频器直流母线电压稳定在520 V左右, 保证了各个电动机的正常运行。

通过仿真, 最终得出以下结论。

1) 超级电容组的储放能作用使得整个过程变压器的功率维持在额定功率附近, 消除了变压器功率利用不均的问题, 能有效提高电源利用效率和修井作业效率。

2) 由于超级电容的能量补偿作用, 直流母线电压在冲击负荷情况下虽然有波动, 但是会在较短时间内消除波动, 波动幅值在20 V左右, 超级电容器的放电作用维持了变频器直流母线电压的稳定, 保证了作业正常进行。

5 结束语

修井作业供电系统引入超级电容器储能, 可以均衡各个时段变压器的功率, 提高电源利用效率。同时, 在冲击负荷情况下, 通过释放储存的能量补给变压器的缺额功率, 能够维持大容量变频器直流母线电压的稳定, 保证修井作业正常进行。

另外, 超级电容用于实际修井作业供电系统, 其充放电电路结构简单, 控制器的设计相对容易实现, 能简化修井系统的结构, 由此消除高压箱式变压器接入带来的安全隐患, 对于油田修井作业来说是十分有利的一种供电策略。

参考文献

- [1] 王锋. 浅析我国油田修井作业技术研究与分析 [J]. 石化技术, 2016, 23 (5): 93-93.
- [2] 王庆群. XJ700电动储能拖挂式修井机的研制 [J]. 石油机械, 2017, 45 (7): 88-92.
- [3] 陈雪丹, 陈硕翼, 乔志军, 等. 超级电容器的应用 [J]. 储能科学与技术, 2016, 5 (6): 800-806.

- [4] 王治国. 超级电容储能技术在网电修井机中的应用 [J]. 石油机械, 2015, 43 (5): 104-106.
- [5] 徐刚, 王树龙, 韩菊, 等. 基于功率补偿的电动修井机控制系统 [J]. 机电工程技术, 2013, 42 (9): 11-15.
- [6] 高胜, 庞伶俐, 常玉连, 等. 修井井口机械自动化技术现状分析与展望 [J]. 石油机械, 2012 (2): 80-85.
- [7] 童亦斌, 吴岫, 金新民, 等. 双向DC/DC变换器的拓扑研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (13): 81-86.
- [8] 马奎安, 陈梅. 超级电容器储能系统充电模式控制设计 [J]. 2010, 27 (7): 85-88.
- [9] 万山明, 吴芳. 开关电源 (Buck电路) 的小信号模型及环路设计 [J]. 电源技术应用, 2004 (3): 142-145.
- [10] 王华, 谢元宝, 伍祚, 等. Buck斩波电路电流连续与电流断续的比较研究 [J]. 船电技术, 2017, 37 (5): 43-45.
- [11] 李继方, 汤天浩, 姚刚. 基于切换系统的储能节能系统双向DC-DC变换器建模与控制 [J]. 电工电能新技术, 2011, 30 (4): 21-25.
- [12] 于超光, 于红理, 胡明清. 风力变桨系统超级电容充电机设计与仿真 [J]. 变频器世界, 2015 (3): 39-42.
- [13] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [14] 张婷, 程红丽, 黄文准, 等. Buck-Boost变换器电流滞环控制策略的研究与改进 [J]. 电子器件, 2016, 39 (2): 320-323.
- [15] 吴高阳, 鲁刚, 王红波, 等. 一种功率可调的恒功率电源 [J]. 电气开关, 2017, 55 (1): 16-19.
- [16] 张永昌, 高基豪. 预测直接功率控制中的数字延迟分析及补偿策略研究 [J]. 电气工程学报, 2016, 11 (11): 1-8.
- (收稿日期: 2018-02-10) **EA**

(上接第64页)

2) 对于单点接地的电缆线路应分析计算, 当发生单相短路故障时, 金属护层感应过电压对电缆绝缘水平及护层电压限制器耐受电压有影响, 避免感应过电压过大, 造成绝缘击穿或护层电压限制器损坏。当电缆在电缆隧道内或电缆沟内敷设时, 设置独立回流线及利用接地线作为回流线, 均具有降低护层感应过电压的作用。针对不同工程, 应核算两种方式对降低感应过电压的效果, 从而选择经济可行的措施。

参考文献

- [1] 刘杰. 高压电缆护套环流分析及防范措施 [J]. 通信电源技术, 2013, 30 (6): 58-61.
- [2] 种鹏蛟, 顾勇刚. 单芯电缆线路交叉互联环流分析 [C]. 2010电力电缆状态检修技术交流会论文集, 2010: 302-304.
- [3] 李国荣, 熊涛, 等. GB 50217—2007 电力工程电缆设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
- [4] 江日洪. 交联聚乙烯电力电缆线路 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [5] 盛洞天, 李明亮. 回流线对电缆护层感应电压的影响分析 [J]. 现代商贸工业, 2011 (14): 271-272.
- (收稿日期: 2018-03-12) **EA**