

海上石油平台电潜泵变压器软起动 技术研究与实践

郭 骏

(中海油能源发展装备技术有限公司, 天津 300452)

摘要: 电潜泵是海上石油平台重要生产设备, 是油田产量形成的关键。电潜泵一般通过升压变压器接入 400 V 供电系统, 是平台电网的末端, 由于海上石油平台以透平发电机组作为电力来源, 与陆地电网没有电气联系, 是一个典型的孤岛电网, 网架结构决定了其系统短路容量小的特点, 尤其是电潜泵所在的供电末端, 短路电流甚至会小于励磁涌流, 给保护整定及设备投运带来不利影响。因此, 以某平台 A28 井为例, 对电潜泵变压器励磁涌流成因进行分析, 结合现场实际情况, 确定涌流抑制方案并现场实践, 取得良好效果。

关键词: 电潜泵; 变压器; 励磁涌流; 软起动

Research and practice of soft start technology for ESP transformer on offshore oil platform

GUO Jun

(CNOOC EnerTech Equipment Technology Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: Electric Submersible Pump(ESP) is an important production equipment of offshore oil platform, and it is the key to the formation of oilfield production. ESP is usually connected to 400 V power system through step-up transformer, which is the end of the power grid of the platform. As the offshore oil platform uses turbine generator as the power source, it has no electrical connection with the land power grid. It is a typical island power grid. The grid structure determines the small short circuit capacity of the system, especially the short-circuit current of the power supply terminal where the ESP is located is even less than the excitation magnetic inrush current, which has adverse effects on protection setting and equipment operation. Therefore, taking well A28 of a certain platform as an example, the causes of inrush current of ESP transformer are analyzed. Combined with the actual situation, the scheme of inrush current suppression is determined and good results are achieved.

Key words: electric submersible pump; transformer; inrush current; soft start

0 引言

海上石油平台广泛采用电潜泵进行石油资源开采, 其中部分水源井、油井采用的电潜泵电动

机功率较大, 配套变压器容量大, 电压档位高, 使得合闸瞬间变压器产生较大励磁涌流, 其冲击幅值甚至会超过开关保护动作值, 导致合闸失败, 设备难以送电运行, 严重影响平台正常生产作业。

传统应对方式为利用每次合闸励磁涌流幅值相差较大特点，多次试合闸直至合上，但这种方式对电网冲击较大，对设备寿命也会造成不利影响，因此需探索抑制涌流的方法，从根本上解决该问题。

1 电潜泵供电形式

电潜泵位于油管底部，通过潜油电缆与井上供电、控制设施连接，利用离心力将井下油液举升至井上生产流程，其井上供电设施包含变压器、VFD 等，典型供电方式如图 1 所示。

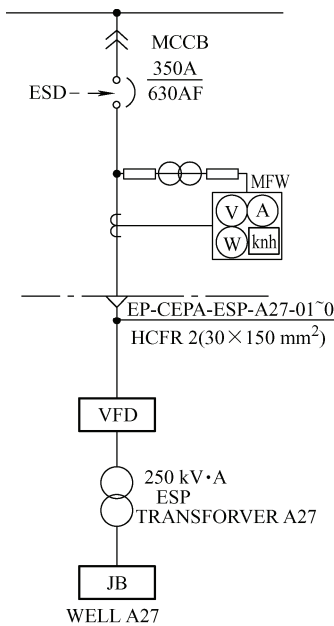


图 1 电潜泵典型供电形式

Fig. 1 Typical power supply form of ESP

- 1) MCCB: 电潜泵供电开关，配备短路保护，可接收平台 ESD 关断指令。
- 2) VFD: 变频器，通过电动机调速控制液量。
- 3) 变压器: 电潜泵深入井下，使用中压供电，由变压器将井上 400 V 电压升压至电潜泵电动机所需电压。
- 4) JB: 动力及控制电缆井上接线箱。

2 电潜泵变压器励磁涌流成因分析及抑制方式选择

2.1 励磁涌流成因分析

变压器是利用电磁感应定律，在基本不改变

传输功率大小的情况下，完成一二次电压、电流幅值变化。在这个过程中，具有强导磁能力的铁心不仅起到对变压器结构的支撑作用，而且为绕组产生的磁力线提供磁回路，加强磁力耦合，减少漏磁通，提高通磁效率。

但变压器铁心磁通存在饱和点，一旦铁心饱和，绕组电压与磁通不再成正比，励磁阻抗大幅降低，励磁电流大幅升高并生成励磁涌流，其幅值决定因素有：

- 1) 合闸初相角。当电压处于过零点时合闸，电压变化率最大，铁心饱和程度最深。
- 2) 剩磁。当剩磁与励磁磁通同相时，合成磁通加深铁心饱和程度。
- 3) 电源电压及系统阻抗。励磁涌流与电源电压成正比，与系统阻抗成反比。

2.2 励磁涌流抑制方式选择

从励磁涌流成因分析可见，通过控制合闸初相角、电压幅值可以抑制其幅值，不同的出发点催生出不同的抑制方式，当前常见励磁涌流抑制如表 1 所示。

表 1 常见涌流抑制方式优劣势对比

Tab. 1 Comparison of common inrush suppression methods

抑制方案	优点	缺点
相控开关	理论上可以完全消除励磁涌流	难以一带多；实际应用影响因素多，难以达到理论效果
串变压器预充磁	可以一带多；适配后涌流抑制效果好；体积小	需要容量适配，通用性较差
串电阻预充磁	可以一带多；适配后涌流抑制效果好	通用性较差，电阻额外功耗较大，体积较大

考虑海上平台特殊作业工况，电潜泵变压器涌流抑制方案应满足三点要求：

- 1) 电潜泵数量较多，一个井口平台电潜泵数量少则十余台，多则数十台，需要涌流抑制装置支持一带多功能。
- 2) 一个平台上电潜泵功率多种多样，其配套变压器容量也不一致，因此要求涌流抑制装置具有良好的适应性。
- 3) 电潜泵控制间空间狭小，无法容纳大型涌流抑制装置。

显然常见的变压器涌流抑制手段并不能同时满足现场应用需求。

软起动器是海上起动大型电动机的常见设备,具有良好的电压控制和一带多功能,受电动机软起动启发,提出利用软起动器进行变压器降压起动方案。

2.3 软起动抑制变压器励磁涌流原理

忽略剩磁影响,变压器励磁涌流 i_0 主要受变压器合闸时电压、相角影响,其表达式为

$$i_0 = \frac{U_m}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} \begin{bmatrix} -\cos(\omega t + \theta) \\ +\cos\theta \cdot e^{-\frac{R_1}{L_1}t} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, U_m 为变压器一次电压; R_1 为变压器一次绕组电阻; L_1 为变压器一次绕组电抗; θ 为电压初相角。

其中, i_0 与 U_m 成正比,软起动器通过控制 U_m 上升趋势实现涌流抑制。

使用软起动器起动变压器时,输出端电压可从 1% 开始按设定曲线上升,变压器逐渐充磁,直至全压输出,变压器从起动电压平滑过渡至工作电压后,由起动回路切换至旁路,变压器可以正常带载工作,软起动过程结束,具体如图 2 所示。

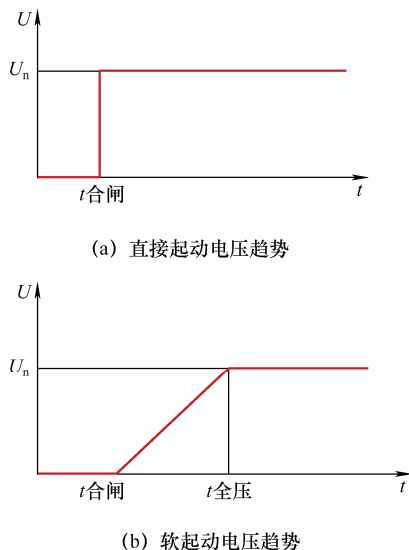


图 2 直接起动和软起动电压趋势

Fig. 2 Voltage trend of direct start and soft start

3 变压器软起动测试与现场实践

3.1 陆地试验

由于变压器软起动在现场没有实践经验,并且实际使用时,变压器内仍有剩磁,剩磁对软起动过程影响程度也需要进行评估。因此,现场应用前先于陆地对软起动方案进行试验,具体方案如图 3 所示。

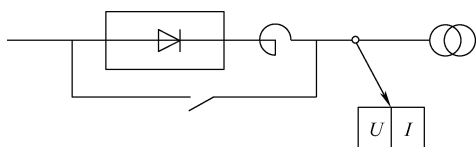


图 3 变压器软起动试验方案

Fig. 3 Soft start test scheme of transformer

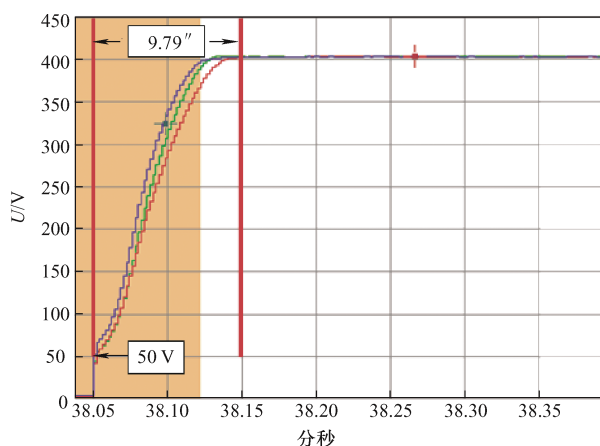
试验设备包括:

- 1) 测试软起动器, 摩托托尼 VMX 系列。
- 2) 测试变压器, 德国 HTT 公司, 容量 250 kV·A, 电压比 620 V/2 250 V, 短路阻抗 4%。
- 3) 检测仪器, FLUKE1760(电流探头:TPS CLAMP 10 A/1 A 夹式电流互感器, 准确度 0.1 级; 电压探头: TPS VOLTPROBE 600 V, 准确度 0.1 级)。
- 4) 试验电源, 380 V 三相动力电, 接变压器 2 250 V 侧。

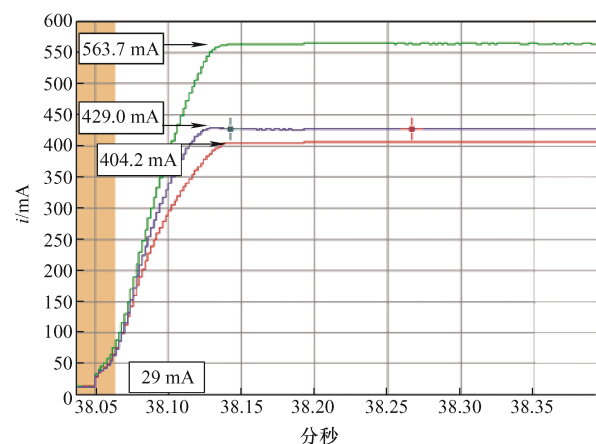
软起动器上电后, 电压初始值设定为 $13\%U_n$, 即 49.4 V, 起动时间 10 s。

现场进行 3 次软起动, 分别记录各次变压器输入电压、电流变化情况, 其中第一次试验数据如图 4 所示(以下电流值均为电流互感器二次值)。

起动过程中电压瞬间值为 50 V, 电流瞬间值为 29 mA; 起动时间为 9.79 s; 起动过程无电流冲击, 电流最大值稳定在变压器空载电流 563.7 mA, 涌流抑制达到预期效果。



(a) 软起动过程电压趋势图



(b) 软起动过程电流趋势图

图 4 软起动过程监测数据

Fig. 4 Monitoring data of soft start process

3 次试验数据如表 2 所示。

表 2 变压器软起动陆地试验数据

Tab. 2 Land test data of transformer soft start

试验	起动电压/V	起动时间/s	起动瞬间最大电流值/mA	稳态最大电流值/mA	电流最大相
第一次	50	9.8	29	563	B
第二次	48.8	9.2	30	564	B
第三次	49.5	9.4	29	563	A

由 3 次试验数据可见,软起动可以有效降低励磁涌流。同时,试验变压器在第 1 次试验前通过二次侧短路消除铁心剩磁,第 2、3 次试验则未进行剩磁消除,因此,软起动过程基本不受剩磁影响。

3.2 现场实践

渤海地区某海上石油平台 A28 井,其变压器

容量 400 kV·A,电压档位 400 V/2 387 V,此前已发生多次无法合闸上电情况,因此选择该井作为软起动现场应用试点。

在完成供电线路改造、软起动柜接通控制电源后,起动值设定为 40 V,时间设定为 15 s。

同样进行 3 次合闸测试,均未出现无法合闸情况,测试数据如表 3 所示。

表 3 变压器软起动现场试验数据

Tab. 3 Field test data of transformer soft start

试验	起动电压/V	起动时间/s	起动瞬间最大电流值/A	稳态最大电流值/A	最高次谐波
第一次	39.0	14.7	5.6	29	5 次 2.5%
第二次	38.6	14.5	7.2	28	5 次 2.4%
第三次	37.9	14.9	4.4	29	5 次 2.4%

3 次起动过程平稳,未记录到大电流冲击,同时起动过程谐波与试验前电网谐波基本一致,现场测试取得良好效果。

4 结束语

通过对电潜泵供电回路加装软起动器改造,实现了变压器的平滑投运,从根本上解决了开关合闸困难的问题,效果非常理想。同时,通过一次回路改造实现了一台软起动器起动多台电潜泵变压器。后续可以在基本功能满足要求的基础上,通过二次回路改造,实现变压器软起动后自动切旁路以及防输出端电压反送功能,降低现场操作工作量的同时,确保软起动器在多台变压器切换起动过程的设备安全。

作者简介:



郭 骏

郭骏(1987—),男,学士,工程师,主要研究方向为海上油田供电技术。

(收稿日期:2020-11-23)EA