海上油田孤岛电网变压器励磁涌流抑制技术的研究及应用

刘 炼，陈雨强，李旭阳，黄 猛

（中海油能源发展装备技术有限公司，天津 300452）

摘要：变压器合闸时产生的励磁涌流影响着海上石油孤岛电网电力系统的安全稳定运行，其引发的保护误动作、开关跳闸和电网冲击等一直是电气人员很关注的问题。分析了励磁涌流产生的原因，结合海上油田孤岛电网的特性，提出抑制变压器励磁涌流的方案，并在实践中得到了很好的应用。

关键词：海上油田电网；变压器励磁涌流抑制

Research and application of excitation inrush current suppression technology for transformer inisolated power grid of offshore oil field

LIU Lian, CHEN Yuqiang, LI Xuyang, HUANG Meng

（CNOOC Energy Development Equipment Technology Co., Ltd. TianJin 300452, China）

Abstract: The inrush current generated when the transformer is closed affects the safe and stable operation of the power system of offshore oil island power grid. The causes of excitation inrush current are analyzed, combined with the characteristics of isolated power grid in offshore oilfields, a scheme to restrain transformer excitation inrush current is put forward, and has been well applied in practice.

Key word: offshore oil field power grid; transformer excitation inrush current suppression

0 引言

陆地电网有许许多多的电网或电站连接在一起，形成了一个庞大、稳定和可靠的电网，对于起动一台变压器来说，陆地电网完全能够承受住带来的冲击，而海上油田电网主要是孤岛运行模式，其生产设施的电源来自海上平台自有的发电机。目前渤海海域发电机主要采用涡轮机组，受制于海上平台空间和项目技术，发电机的装机容量都不是太大。由于变压器本身特性所致，变压器每次送电都会产生很大的励磁涌流。变压器容量越大，产生的励磁涌流就越大，对电网的冲击也越大。直接给变压器上电必然会导致电网不同程度的电压骤降，这会给已经稳定运行的电网造成冲击，给整个油田的生产埋下了不确定性的风险。

为了研究海上孤岛电网空投变压器如何能够使变压器的励磁涌流得到有效抑制，最大程度减小对电网的冲击，避免造成投运变压器时设备停电或平台停电，结合现有电网技术和设备厂家的技术，目前海上平台采用变压器一次侧配电柜加装涌流抑制器、软起动柜起动变压器及配电柜分选相投切技术来解决此问题，为“小容量电站大变压器”模式下的电网提供解决思路。

1 涌流抑制器在变压器起动上的应用

海上某两个电站平台通过一台联络变压器

将两个电站进行组网，其中一老平台设计为3台3.3 kV、4 750 kW发电机，而新增联络变压器容量为8 000 kV·A 、3.3/10.5 kV，老平台为正常生产平台，为避免联络变压器初次上电造成平台失电，采用变压器一次侧（3.3 kV）配电柜加装涌流抑制器装置，通过涌流抑制器装置控制配电柜合闸角度，减小涌流冲击。

1.1 现场试验数据

此次涌流抑制器装置采用深圳国立公司生产的SID－3YL装置，调试人员根据要求对配电柜进行5次合分闸操作，使变压器上电与断电。联络变压器及涌流抑制器技术参数如表1所示，现场调试数据如表2所示。

表1 联络变压器及涌流抑制器技术参数

Tab.1 Technical parameters of connection transformer and inrush current suppressor

联络变压器技术参数			
额定容量	8 000 kV·A	变压器两侧电压比	3.3 kV/10.5 kV
高压侧一次额定电流	1 400 A	高压侧TA电流比	1 500 A/1 A
高压侧二次额定电流	0.933 A	高压侧二次额定电流峰值	1.320 A
SID-3YL 装置数据			
装置编号	3YL1404009	软件版本号	V3.25

表2 现场调试数据

Tab.2 Field debugging data

项目	操作时间	时间/角度定值（ms）	实测时间/角度（ms）	最大涌流峰值/A		
				A	B	C
合闸1	06270117	53.0/90°	50.0/40.1°	0.987	0.552	0.947
分闸1	06270127	28.5/90°	27.1/70.9°	—	—	—
合闸2	06270135	50.0/90°	51.9/127.8°	2.352	2.386	1.265
分闸2	06270141	27.1/90°	27.0/94.4°	—	—	—
合闸3	06270145	51.9/90°	50.6/71.1°	0.849	0.271	0.820
分闸3	06270149	27.1/90°	27.0/93.9°	—	—	—
合闸4	06270153	51.3/90°	51.0/90.6°	0.058	0.617	0.621
分闸4	06270155	27.1/90°	26.8/89.6°	—	—	—
合闸5	06270159	51.3/90°	51.5/98.0°	0.268	0.753	0.691

第一次合分闸变压器涌流波形如图1、图2所示。根据此前现场开关试验得到的数据，整定合闸时间定值为53.0 ms；整定合闸角度为90°。合闸后，由图1可见，合闸角度为40.1°，合闸时间为50.0 ms，三相最大涌流是峰值为0.987 A，约为额定值1.32 A的0.74倍。事实上，由于此时变压器内剩磁未知，第一次合闸，涌流抑制的效果是随机的，目的主要是为了得到准确的合闸时间。

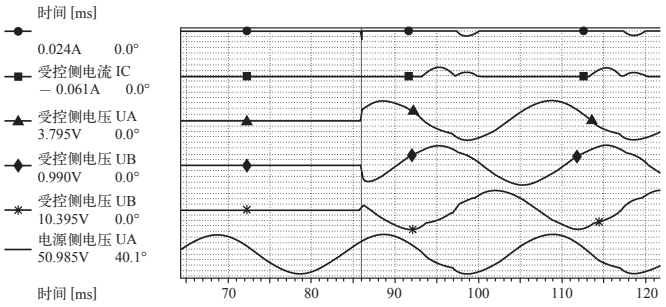


图1 第一次合闸变压器涌流波形

Fig.1 Inrush current waveform of first closing transformer

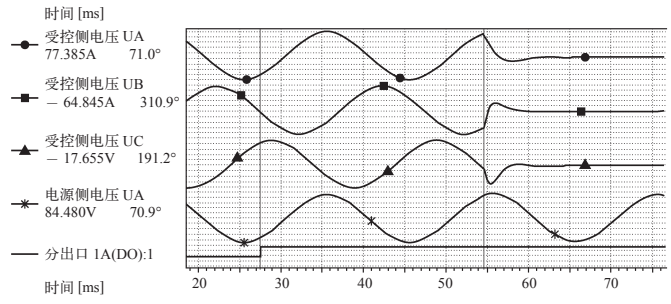


图2 第一次分闸变压器涌流波形

Fig.2 Inrush current waveform of first switching transformer

第四次合分闸变压器涌流波形如图3、图4所示。根据前三次合闸的数据，合闸时间改为51.3 ms，合闸角度90°。合闸后，由图3可见，合闸时间为51.0 ms，合闸角度为90.6°，因为第三次分闸时，分闸角度也控制为93.9°，合闸角度和上一次分闸角度接近，偏磁与剩磁相互抵消，因此励磁涌流得到控制，三相最大涌流为0.621 A，仅为额定值的约0.47倍。

根据前三次分闸的数据，分闸时间和分闸角度均无须修正，分别为27.1 ms和90°。分闸后，由图4可见，分闸时间为26.8 ms，分闸角度按照整定角度为89.6°。

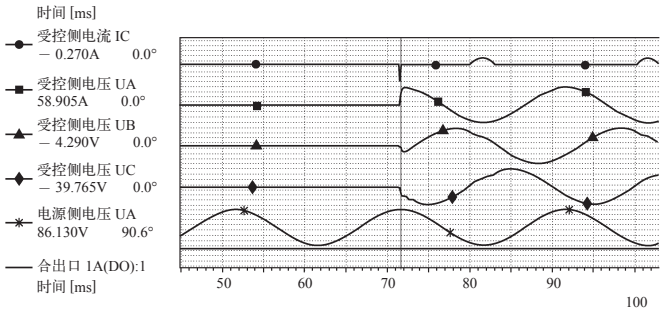


图3 第四次合闸变压器涌流波形

Fig.3 Inrush current waveform of the fourth closing transformer

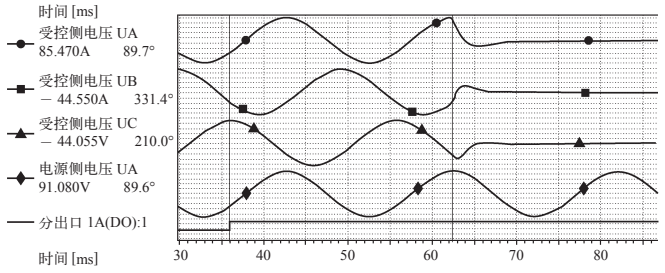


图4 第四次分闸变压器涌流波形

Fig.4 Inrush current waveform of fourth switching transformer

1.2 试验结论

对于三相联动的断路器，涌流抑制的原理为剩磁与偏磁相互抵消的控制策略，装置不仅要控制合闸，还要控制分闸，分闸决定剩磁的极性及大小，合闸决定偏磁的极性和大小。

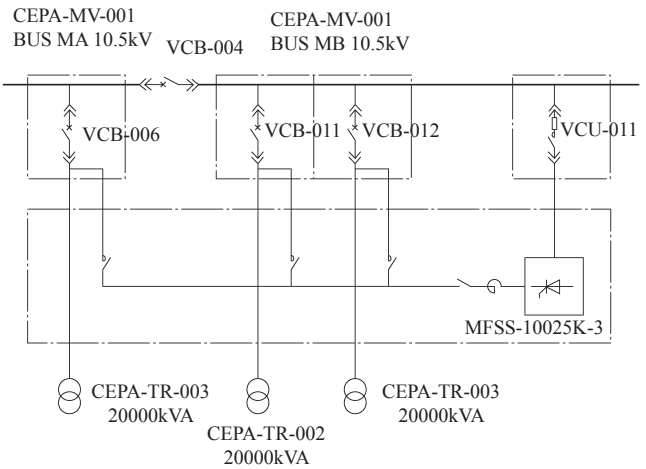
根据录波分析，现场的变压器经过几次合分闸试验，得到了准确的合闸与分闸时间，最后通过SID－3YL装置的精确相控实现了偏磁与剩磁相互抵消，使磁通不饱和，最后两次合闸投运时涌流峰值为额定电流峰值的0.6倍左右，实现了涌流的有效抑制。

1.3 应用场所及优缺点

此方式可应用在发电机组服役时间长、运行不太稳定或发电机组小、热备容量不足及变压器容量较大的改扩建工程上。具有如下优点：①改造方便，利用此项技术改造工程量不大，且能够较好地达到变压器涌流效果；②抑制效果较好。缺点是需多次空投变压器来调整涌流抑制器内部设置参数，对电网的安全运行存在一定的风险。

2 软起动器在变压器起动中应用

渤海某平台作为油田群二期新建的大型电站平台，在设计之初就布局3台10.5 kV、25 MW的大型发电机和3台20 MV·A电压比为10.5/35 kV的超级变压器，而变压器起动时的励磁涌流一般为8～10倍额定电流，因此在设计时，通过软起动柜的方式对变压器进行起动，以减少对电网的冲击，当运行到50 Hz时，通过切换至配电柜给变压器供电。平台变压器供电单线图如图5所示。



注：

1．软起动器进线方式为下进下出，电缆连接。

2．软起动器出线端不能接容性器件，如阻容式避雷器等。

3．软起动器在出厂都已做过测试，严禁在现场做高压测试。

4．软起装置的出线接在对应变压器出线开关柜的下口。

图5 平台变压器供电单线图

Fig. 5 Single line diagram of transformer power supply on platform

该设计方案采用了一台摩托托尼公司生产的MFSS型中压软起动器，该软起动器的应用电压范围为交流1～13.8 kV，且具备如下特点：

1）晶闸管（SCR）功率单元。在每相中，采用相同参数的晶闸管首先反并联为一对，然后串联安装在一起。

2）*RC* 吸收网络。为功率单元提供瞬间过电压保护，以减少 d*v*/d*t*电压冲击的危害。

3）触发电路。采用宽脉冲触发电路触发晶闸管，通过光纤和脉冲变压器与控制电源进行隔离。

该软起动进线电源引自接触器VCU11，软起动柜出来3根三芯电缆分别接到3台变压器进线断路器下口，通过软起动柜面板上的选择按钮可以任意选择要起动的支路变压器。

2.1 现场数据测试

为了检验软起动应用的效果，通过专用仪器对3台主变压器送电过程进行检测。变压器对电网的冲击主要来自于冲击电流，故只采集电流数据就能反映变压器的冲击情况。将电流探头悬挂于软起动器总出线侧，记录变压器整个的测试过程。由于变压器是新装设备，在正常投运前必须进行3次的上电测试，所以分析仪分别记录了每台变压器3次送电的电流冲击情况。其技术参数如表3所示。

表3 变压器 CEPA－TR－001/002/003技术参数

Tab.3 Technical parameters of transformer CEPA－TR－001/002/003

容量	20 MV·A	电压比	10.5/35 kV
10.5 kV侧的额定电流（一次）	1 099.7 A	10.5 kV侧额定电流电流值（二次）	5.49 A

2.2 主变压器CEPA－TR－001/002/003软起动过程的电流

通过软起动柜起动 CEPA－TR－001/002/003变压器3次空载带电，记录冲击电流波形，了解对电网的冲击情况。各起动数据如表4所示，起动电流波形如图6～图8所示。

2.3 试验结论

现场通过软起动器从10.5 kV侧起动3台变压器共计9次的测试，数据表明变压器从软起动合闸到切换至配电柜供电，起动时间都在15″之内完成，且起动过程中产生的最大电流约2.2 A，约为二次额定电流（I_N=5.49 A）的0.4倍，比理论8~10倍额定电流小很多。

2.4 应用场所及优缺点

此方式主要应用在发电机组容量较小、联络变压器容量较大的新建联网工程上。优点如下：①起动方便，对电网冲击小；②空投变压器时利用此项技术能够很好地减小变压器励磁涌流电流，对电网的冲击小，起动完成后，自动切换至配电柜供电，并自动软起动柜自动退出。缺点如下：①造价较高；②需要建造时比常规方式要多购买一套软起动柜，造成工程造价增加。

表4 变压器 CEPA－TR－001/002/003起动数据

Tab.4 Starting data of transformer CEPA－TR－001/002/003

变压器 CEPA － TR － 001 起动数据				
序号	起动时间	A相最大电流/A	B相最大电流/A	C相最大电流/A
第一次	14.4″	1.61	1.71	2.03
第二次	14.2″	1.55	1.62	2.01
第三次	14.6″	1.58	1.68	1.98
变压器 CEPA － TR － 002 起动数据				
序号	起动时间	A相最大电流/A	B相最大电流/A	C相最大电流/A
第一次	14.6″	1.59	1.69	2
第二次	14.4″	1.57	1.67	2.05
第三次	14.4″	1.61	1.68	2.01
变压器 CEPA － TR － 003 起动数据				
序号	起动时间	A相最大电流/A	B相最大电流/A	C相最大电流/A
第一次	14″	1.66	1.79	2.09
第二次	14.2″	1.65	1.78	2.1
第三次	14″	1.66	1.75	2.13

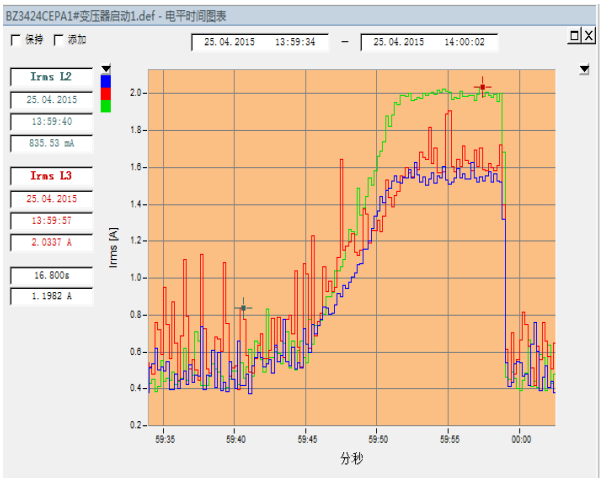


图6 CEPA－TR－001变压器起动电流波形图

Fig.6 Starting current waveform of CEPA－TR－001 transformer

3 选相投切技术在变压器起动中的应用

选相投切技术其实质就是根据不同的负载特性，控制开关在电压或电流最有利的相位(电角度)完成合闸或分闸，以主动消除开关过程所产生的涌流和过电压等电磁暂态效应，或提高开关的开断能力，这是当前国内外开关智能化的前沿课题

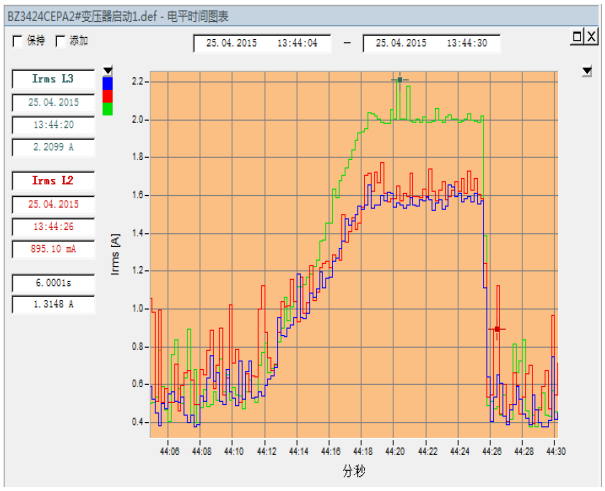


图7 CEPA－TR－002变压器起动电流波形图

Fig.7 Starting current waveform of CEPA－TR－002 transformer

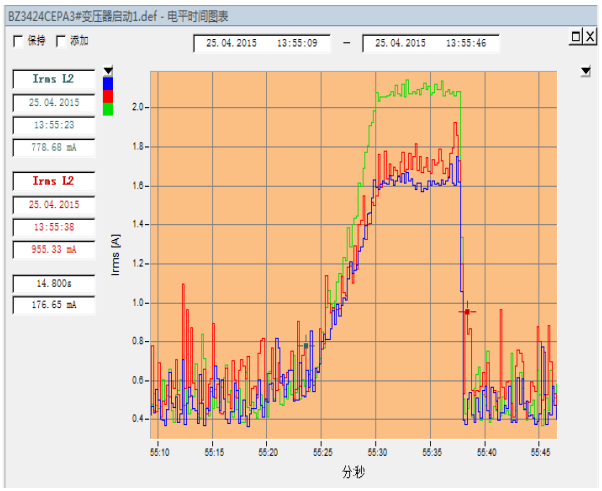


图8 CEPA－TR－003变压器起动电流波形图

Fig.8 Starting current waveform of CEPA－TR－003 transforme

之一。该装置采用三相独立的永磁断路器作为相控操作的一次设备：永磁断路器的三相操动机构完全独立，整体采用垂直布置，除“五防联锁”等辅助结构外，每相只有一个活动部件。在大幅降低机械故障的同时，彻底消除机械磨损、机械疲劳等造成分合闸时间漂移的因素。

目前海上平台电网已开始应用此技术，采用的是深圳国立公司生产的GLS－200智能相控开关柜。经过现场调试，变压器空投时涌流控制在变压器额定电流的2倍以内，对海上平台电站的冲击很小，能够很好地保证电站的稳定运行。

此方式主要应用在发电机组容量较小、联络变压器容量较大的新建或扩建联网工程上。具有技术先进、抑制效果很好、起动方便及对电网冲击小的优点；同时能够实现相控合闸和分闸、继电保护等于一体的配电柜功能。缺点是相比于加涌流抑制装置，工程费用要高一些。

4 结束语

海洋石油平台电力系统作为一种典型的孤岛电网运行模式，主要采用的是以上三种技术，在变压器空投时能够很好地抑制变压器涌流，从而达到稳定电网的目的。该三个方案的设计实施极大地消除了大容量变压器送电过程对小电网的影响，具有很好的应用和推广价值。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部．电气装置安装工程电气设备交接试验标准：GB 50150-2016[S]．北京：中国计划出版社，2016：22-29.

[2] FLUKE．1760电能质量分析仪用户手册[G]．USA：FLUKE公司，2006.

[3] SID－3YL．涌流抑制器中文技术说明书_V3[1].12[G]．深圳：国立智能公司，2012：1-57.

作者简介

刘炼（1984－），男，本科，学士学位，工程师。研究方向为海上石油平台电力系统建设维护、电气设备调试及故障排查，天津市科技协会成员。

(收稿日期：2018－01－03)EA