

「电力系统」

海上石油平台常见中压系统过电压研究

文/海洋石油工程股份有限公司设计公司 郭明荃

研究海上石油平台中压系统几种常见过电压的产生与性质，及其对电力系统和电气设备的危害，对于电气设备制造和电力系统运行都具有重要意义；结合具体项目探讨海洋平台上几种常见过电压的预防和保护方法，对中压电网绝缘配合的原则进行简单的说明和探讨。

过电压是指电力系统在特定条件下所出现的超过工作电压的异常电压升高，属于电力系统中的一种电磁扰动现象。电气设备的绝缘长期耐受工作电压，同时还必须能够承受一定幅度的过电压，这样才能保证电力系统安全可靠的运行。

在进行海上油气田开发工程设施的电力系统设计时，需考虑各种过电压、各种限压措施和电器装置绝缘水平三者之间的配合关系的同时，还要全面考虑设备造价、维修费用以及故障损失等方面，力求取得较高的经济效益。

过电压的产生与性质

电气设备在运行中承受的过电压分外过电压和内过电压两大类。外过电压又称雷电过电压、大气过电压。由大气中的雷云对地面放电而引起的，分直击雷过电压和感应雷过电压两种。内过电压是指电力系统内部运行方式、系统参数发生改变时电磁能产生振荡，积聚而引起的内部过电压，有暂态过电压、操作过电压和谐振过电压。

海上石油平台中压系统几种常见的内过电压有以下几种。

1. 真空断路器在关合和开断感性负载时产生的操作过电压

感性负载包括高压电动机、发电机、变压器

和电抗等。在海上石油平台上，几乎绝大部分负都是感性的。

(1) 真空断路器“开断”感性负载时产生的操作过电压

在中压电网中，真空断路器的使用日益广泛。因为它较少产生爆炸燃烧事故，具有检修维护工作量小，可以频繁操作，开断能力强，使用寿命长，可供选择的品种多，并且价格适中等特点。以高压电动机为例，电动机绕组是以电感为主，这种回路的电感电流是不能突变的，截流必然引起电动机电感与回路电容之间剧烈的电磁振荡。而这一截流现象，却引发了截流过电压的产生，甚至继而引发多次重燃过电压和三相同步开断过电压。

这些类型过电压常常结伴而生，并有一个共同特点，就是幅值高、频率高（陡度高），相间过电压比相对地高30%~50%，而能量并不大。高的幅值和高的陡度，将危及带绕组电气设备的匝间绝缘。绕组承受的匝间电位梯度由其电感和电流陡度决定，即

$$L \frac{di}{dt}$$

由于陡度极大，因而匝间电位梯度极高。再者，整个绕组各匝间的电位分布是不同的，各

匝对地（铁心）之间的电容不均匀，一般靠近电源侧的几匝要比靠近中性点的几匝电位要高出许多。现场许多事故实例都证明，在真空断路器操作过电压作用下，高压电动机和电弧变压器的损坏部位大多集中在进线端的匝间。

（2）真空断路器在“关合”感性负载时产生的操作过电压

真空断路器在“关合”时也会出现类似“开断”过程的过电压，主要原因是断路器在关合过程中“弹跳”现象。触头接通后又分开，多次的“弹跳”相当于经历了多次的开断。

2. 中压电网间歇性弧光接地过电压的产生、性质和危害

在中性点不接地电网，发生单相接地时流过故障点的电流为电容电流。因为电容电流的相角超前电源电压 90° ，当电容电流过零时，故障点的电弧熄灭，而此时故障点的电压正好为最大值。如果接地电容电流较大，故障点电弧离较为严重，有可能使故障点刚刚自熄的电弧又重新点燃，导线上的电荷重新分配，对地电压再次发生聚变。

这种过电压一般不超过 $3.0U_{xg}$ （最高运行相电压），极少达到 $3.5U_{xg}$ 。一般低于设备绝缘的耐受水平。但它波及全电网，持续时间长，能量大，极易发展成为相间故障。有时造成断路器的异相开断，有时对绝缘较弱的旋转电机构成威胁，有时会使无串联间隙的氧化锌避雷器损坏。

3. 中压电网谐振过电压的产生、性质和危害

电网中的电感、电容元件，在一定的电源作用下，受到操作故障的激发，使得某一自由振荡频率与外加强迫频率相等，形成周期性或准周期性的剧烈振荡，出现共振现象，电压幅值急剧上升，产生谐振过电压。

谐振过电压包括线性谐振、铁磁谐振（非线性）和参数谐振过电压。在中压电网中，线性谐振和铁磁谐振是多发常见情况。

谐振过电压时间长、能量大，可使电网中性点位移，电压互感器熔断，电压互感器过热爆炸或避雷器、阻容吸收器损坏。

过电压的保护

1. 开断旋转电机、变压器等感性负载引起的操作过电压的保护

用能量守恒定律可以导出截流过电压的估计值。

初始电流被截断后，剩余的截流将以电磁能形式存在于电动机绕组中，即

$$\frac{1}{2}LI_{ch}^2$$

式中， L 为电动机电感量，单位为H； I_{ch} 为截流幅值，单位为A。

随即电磁能向电能转换，向回路中的电容充电，直达到电压为最高值为止。此时电能为

$$\frac{1}{2}CU_m^2$$

式中， C 为回路电动机绕组对铁心、电缆对地等杂散电容的等效电容，单位为F； U_m 为等效电容上的电压，单位为V。如图1所示。

由于

$$\frac{1}{2}LI_{ch}^2 = \frac{1}{2}CU_m^2$$

则

$$U_m = I_{ch} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

这里忽略了截流时电感上的电压降、回路电阻和转换效率等。由于 L 一般为毫亨（mH）级， C 为皮法（pF）级，则可以估算出 U_m 理论上能达到 $10^5 \sim 10^6$ V。据现场试验结论， U_m 约为运行电压的5~6倍。截流和断路器上的电压波形如图2所示。

（1）解析限制过电压幅值的几种措施

1) 降低截流值 I_{ch} 。有些厂商以牺牲断路器开断性能为代价，在触头上添加铍等易蒸发的合金，降低真空度，降低刚分速度，尽量降低截流值的大小。其实它对降低过电压幅值作用甚微，且还不能降低振荡频率。

2) 装设避雷器。用来直接限制截流过电压的幅值。这是国内较为普遍的做法。电力行业标准《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》（DL/T 620—1997）中也推荐其为保护设备之一。但是这种保护措施尚有许多不足之处，而且不能降低振荡频率。

3) 改变电容 C 值。 C 值增大 $10^4 \sim 10^6$ 倍，电压的幅值会下降 $1/100 \sim 1/1000$ 。总之，改变后的电容 C 值由原来的皮法（pF）级升为微法（μF）级，可以非常有效地改变了过电压的频率和幅值。所以大多数西方国家都用阻容吸收器保护这种过电压，电力行业标准DL/T 620—1997也推荐阻容吸收器作为保护设备之一。

(2) 限制过电压的振荡频率,降低操作波陡度由

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

可知,只有增加振荡回路中的电感 L 和电容 C 。

1) 电感 L 取决于旋转电机的次暂态电抗和变压器的短路阻抗,是不可改变的。

2) 电容 C 由回路中的分布电容确定,一般为皮法(pF)级。若给回路中并联一个(微法) μF 级的集中电容,则总电容量可增大 $10^5 \sim 10^6$ 倍,频率下降到 $1/(10^2 \sim 10^3)$,把频率控制到千赫级的水平,大大减小过电压对匝间绝缘的破坏。

一些国外厂商,如ABB、西门子和阿尔斯通等,提供给中国的发电机断路器两侧自带并联电容,也是以此为目的的。

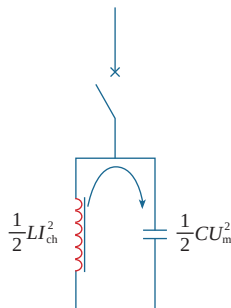


图1 电磁能与电能的转换

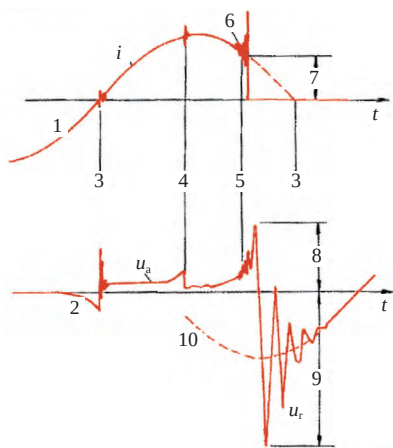


图2 典型截流的电流(上)和开关上电压(下)波形

2. 间歇性弧光接地过电压的控制

这种过电压波及面广、能量大、持续时间长且危害性很大。但目前尚没有专门的设备能够有效制约该种过电压。所以,目前最好的办法是避免间歇性弧光接地过电压发生。

对于中压电缆电网和连接有旋转电机的电

网,中性点宜采用电阻接地方式。电阻(R)的取值应保证故障点的阻性电流 I_R 大于容性电流 I_C 。一般取

$$I_R \geq (1 \sim 1.5) I_C$$

式中, I_R 为电网最大运行相电压 U_{xg} 与电阻 R 的比值,单位为A; I_C 为流经故障点的电容电流,单位为A。

上式的物理概念是,在接地故障点加注阻性电流,使故障点成为以阻性电流为主阻容性电流。其相角超前电压小于 45° ,在电流过零熄灭时,故障点间隙的恢复电压不高,不足以使间隙再复燃。

海上某油田群中电力计算的容性电流为9.55 A,主发电机中压系统采用高阻接地就是为了避免间歇性弧光接地过电压发生。所以可以选择流过电阻的阻性电流为10 A,系统电压为10.5 kV,此时计算的接地电阻值为

$$R_d = \frac{U_1}{\sqrt{3}I_R} = \frac{10.5 \times 1000}{\sqrt{3} \times 10} \approx 600 \Omega$$

如果不要求带故障运行,连接有旋转电机的电网,不论是架空线或是电缆供电,统一按电阻接地方式接地是较好的选择。一旦出现单相接地便立即跳闸,有利于绝缘配合,还可以减轻对铁心的烧损。

3. 中压电网的谐振过电压的限制

(1) 要尽量避免谐振过电压发生

1) 带有自动跟踪装置的消弧线圈,跟踪过程要偏离谐振点,保证脱谐度 $\nu \neq 0$ 。

2) 选用同期性能较好的断路器,不在高压侧采用熔断器等,使变压器的高压侧避免产生零序过电压,以防止变压器传递过电压和铁磁谐振过电压。

3) 选用励磁性能好、饱和点高的电磁式电压互感器。避免使用铁心磁导率低、铁心截面小的劣质产品。

(2) 谐振过电压发生时的应对

一旦谐振过电压发生,要设法降低幅值,缩短时间。可采取的措施如下。

1) 在消弧线圈回路中串联阻尼电阻。

2) 在变压器6~10 kV侧每相加装0.1 μF 以上的对地电容,加大低压侧相对地电容 C_0 ,是一种可靠的限制传递过电压的方法。在断路器与变压器之间装1台阻容吸收器可满足此要求。

(下转第101页)



图5 380 V/80 kW模块式APF各监测点温度

380 V/80 kW模块式有源电力滤波器运行要求。

结束语

针对模块式有源电力滤波器进行了结构和散热系统优化设计,提出了一种高功率模块式有源电力滤波器结构设计和散热系统设计方案,并搭

建了试验平台对设计方案进行了验证,试验结果表明,该设计方案能够满足380 V/80 kW模块式有源电力滤波器运行要求,且体积仅为485 mm×615 mm×215 mm,具有很好的市场前景。EA

(收稿日期:2017.12.05)

(编辑:刘群焱)

(上接第98页)

3) 在电压互感器开口三角形绕组上装设灯泡或者专用消谐器。

4) 在电压互感器一次绕组的中性点上装设专用消谐器。

5) 在电网中装设四级式自控式阻容吸收器,当其动作时,在零序回路中突然接入电阻和电容,对破坏谐振条件、阻尼谐振有一定的作用。

目前,在渤海某组网项目中6.3 kV/35 kV变压器高压侧采用带有自动跟踪装置的消弧线圈,容量为3 200 kV·A,电压为21.22 kV,调节范围为65~145 A。其他海上项目中也有在PT控制回路安装了消谐电阻。

4. 中压电网绝缘配合的原则的简单说明

结合以上分析,在中压电网,绝缘配合原则有以下特点。

1) 针对不同的过电压,采取不同的限压措施。

2) 由于设备和装置的绝缘水平在正常情况下能够耐受操作过电压,因此一般不采用特别措施来限制操作过电压,也不要求避雷器在内过电

压下动作。但保护真空断路器操作过电压的情况除外。

3) 对单相接地间歇性弧光接地过电压和谐振过电压,要避免其发生,而不采取特别措施加以保护。一般的电气设备要能够耐受这两种过电压的作用。

结束语

对于开断感性负载引起的操作过电压,在保护旋转电机等弱绝缘设备的情况下,还存在一些需要进一步探讨的问题:虽然大部分中高压电机都装有避雷器,但是电机匝间绝缘损坏的问题仍比较严重,主要原因就是传统的避雷器基本没有保护匝间过电压的能力,因此建议在降低电网高次谐波的前提下,应用阻容吸收器来保护操作过电压,在安装配置时通盘考虑,注意抑制因增大接地电容而引起的接地电容电流大和与电压互感器匹配不好形成铁磁谐振的问题。EA

(收稿日期:2018.03.11)

(编辑:刘群焱)