[消弧线圈]

无人值守变电所人工调谐消弧线圈存在问题分析

文/中油电能供电公司电力调度中心　邹德玺

分析了大庆油田电网无人值班变电所人工调谐消弧线圈运行状况，探讨了人工调谐消弧线圈在实际运行中比较突出的问题。通过对比各种解决方案的可行性，提出了优先在大庆油田电网无人值守变电所采用自动跟踪补偿消弧线圈的建议。

近年来，大庆油田电网规模不断扩大，系统运行方式经常调整，导致电容电流变化范围越来越大，而且波动频繁。无人值守变电所人工调谐消弧线圈由于调感方式落后，在实际运行中以下两个问题比较突出：一是常态运行方式下脱谐度过大，补偿效果不佳；二是非常态运行方式下线路加长时，消弧线圈脱谐度变小，中性点位移电压过大，造成35 kV系统三相电压不平衡。本文通过对无人值守变电所人工调谐消弧线圈的运行状况，及三相电压不平衡实例进行分析，提出油田电网无人值守变电所应采用消弧线圈自动跟踪调谐装置，自动、快速地调整电感值，使电网的脱谐度随时处于规定范围之内，可靠熄弧，控制弧光过电压。

人工调谐消弧线圈补偿系统常态方式下脱谐度过大

消弧线圈脱谐度的整定，控制在±5%以内最佳，超过10%抑制弧光过电压效果就减弱，当脱谐度V超过20%时，单相接地时抑制弧光过电压的效果与不投消弧线圈一样。如果脱谐度V值整定过小时，有可能产生谐振，或造成35 kV系统中性点位移电压U_0增大，引发母线三相电压不平衡，甚至产生虚幻接地。

1．油田无人值守变电所消弧线圈运行状况

无人值守变电所消弧线圈状况如下表所示。

由下表统计、计算的数值来看，常态运行方式下，油田电网无人值守变电所消弧线圈补偿系统存在以下问题：①张铁匠变电网不对称度已达

表　无人值守变电所消弧线圈状况表

变电所	补偿方式	电容电流 I_C/A	电感电流 I_L/A	残流 /A	脱谐度 /(%)	网络不对称度 /(%)	中性点不对称电压 /V	补偿后中性点位移电压 /V
杏南变电所	人工调谐	17.36	23.6	6.24	36	1.2	257	707
杏北变电所	人工调谐	10.06	14.8	4.84	47	1.59	349	737
张铁匠变电所	人工调谐	11.06	17.6	6.52	59	5.2	1148	1320
南五变电所	人工调谐	11.49	14.8	3.31	29	0.58	127	434
龙河变电所	自动跟踪	7.11	–	–	–	2.5	544	–

注：1. 龙河变电所为自动跟踪消弧线圈，因阻尼电阻不匹配，需厂家处理，未列入统计。
2. 其他变电所电容电流I_C，位移电压U为实测值。电感电流I_L为消弧线圈实际补偿电流。其他数值为计算值，仅供参考。

到5.2%，这也是张铁匠变电所消弧线圈退出运行时，三相电压不平衡的主要原因，同时也造成该所消弧线圈串联阻尼电阻，仍然不能将脱谐度整定在最佳范围；②其他变电所人工调谐消弧线圈没有串联阻尼电阻，由于考虑限制中性点位移电压，脱谐度整定都比较大，全部超过20%。

2．人工调谐消弧线圈脱谐度整定较大的原因

消弧线圈整定时，流过故障点的残流应尽量小，一般应＜5 A，最大不超过10 A。因为残流越小，越利于电弧的熄灭，但要防止脱谐度过小造成串联谐振，危及设备的安全运行。脱谐度的计算公式为

$$V=\frac{I_C-I_L}{I_L} \tag{1}$$

式中，I_c是对地电容电流；I_L是消弧线圈电感电流。

中性点的位移电压不超过相电压的15%。一般情况下，不宜采取欠补偿的运行方式。中性点的位移电压的计算公式为

$$U_o=\frac{K_C\times U_a}{\sqrt{V^2+d^2}} \tag{2}$$

式中，U_o是系统中性点位移电压。

$$K_c=\frac{c_1+a^2c_2+ac_3}{c_1+c_2+c_3} \tag{3}$$

式（3）为补偿电网的不对称度，典型值为1.5%。

$$d=\frac{3g_0+g_p}{3wc_0} \tag{4}$$

设$g_1=g_2=g_3=g_0$，d为补偿电网的阻尼率，典型值为5%。

以杏南变电所为例：由于人工调谐消弧线圈未串联阻尼电阻，如果使脱谐度V小于10%，根据式（1），中性点残流必须＜1.76 A。根据式（2）计算可知，中性点位移电压U_o将大于2.36 kV。此时消弧线圈中性点残流过小，位移电压过大，接近谐振范围。即使按脱谐度V＜20%整定，中性点残流也要＜3.52 A，考虑到在处理事故、异常紧急调整方式时，线路加长20多km就有可能造成谐振，这在实际运行中是不允许的。可见，人工调谐消弧线圈脱谐度整定过大的原因主要是：①人工调谐消弧线圈未串接阻尼电阻，无法抑制中性点位移电压过高；②人工调谐消弧线圈不能实时测量系统实际电容电流，自动调节档位，为了满足电网紧急调整方式需求，脱谐度在整定时必须留出较大裕度。

人工调谐消弧线圈非常态方式下（线路加长）中性点位移电压高

无人值守变电所由于客观原因，方式调整时人工调谐消弧线圈无法及时调整档位，造成三相电压不平衡的现象。2018年10月14日，杏南变电所35 kV母线三相电压不平衡，A相22.0 kV、B相18.8 kV、C相23.4 kV，原因是宋芳屯变电所检修、主变压器增容，杏南35 kV系统增加线路30.162 km。造成系统电容电流增加，杏南变消弧线圈脱谐度降低，中性点位移电压过大。令杏南变电所消弧线圈退出运行后，35 kV母线电压恢复正常。

分析如下：

杏南变1#、2#消弧线圈均在IV档，合计补偿电流为$I_L=23.2$ A，常态方式电容电流$I_c=17.6$ A。

增加线路电容电流为

$$I_{c1}=3.3U_nL=3.3\times35\times30.162=3.48\ \text{A}$$

非常态方式电容电流为

$$\Sigma I_c=I_c+I_{c1}=21.08\ \text{A}$$

$$\text{脱谐度}V=\frac{I_C-I_L}{I_L}=\frac{21.08-23.2}{23.2}=-9\%$$

根据式（2）计算中性点位移电压（取不对称度$K_c=1.5\%$；阻尼率$d=5\%$）为

$$U_o=\frac{K_C\times U_a}{\sqrt{V^2+d^2}}=\frac{1.5\times22\ \text{kV}}{\sqrt{(-9)^2+5^2}}=3.21\ \text{kV}$$

通过分析可知，由于倒入杏南系统的35 kV变电所多采用了电缆进户，增加的电容电流，所以实际脱谐度更小，中性点位移电压实际值3.21 kV，超过2.36 kV。这也是杏南变电所35 kV系统非常态方式下（线路加长），三相电压不平衡的主要原因。

上述问题对系统的影响

1）常态运行方式下脱谐度过大：将造成消弧线圈补偿效果不佳，单相接地时弧光过电压倍数较高，考验系统绝缘，易发展成两相短路。

2）非常态（线路加长）时中性点位移电压过高：①造成35 kV系统PT一次保险熔断，影响保护正确动作，计量不准确；②35kV系统接近全补偿范围，较小的扰动就可能使系统发生谐振，危及系统安全运行；③三相电压不平衡使变压器处于不对称运行状态，造成变压器的损耗增大（包括

空载损耗和负载损耗）。另外会造成变压器零序电流过大，局部金属件升温增高，影响变压器使用寿命；④三相电压不平衡将导致增加数倍的不平衡电流，使电动机逆扭矩增加，从而使电动机温度上升，效率下降，能耗增加，发生振动。

解决方案分析

1）人工调谐消弧线圈补偿系统为了防止中性点位移电压高，常态运行方式下脱谐度都整定过大。可以在消弧线圈串接阻尼电阻，增大阻尼率解决。根据式（2）可知，增大阻尼率可以抑制中性点位移电压，这样就可以将脱谐度相应调低。

优点：投资较少，技术较成熟。缺点：无法解决人工调谐消弧线圈档位少，调脱谐度有局限性。另外在油田系统中，消弧线圈加装阻尼装置，实际运行中由于中性点不平衡电流存在，经常烧毁阻尼电阻。

2）为防止频繁调整时，电容电流增大，造成中性点位移电压过高，可以停用消弧线圈。目前短期调整运行方式，采用这种办法较多，实际控制母线电压不平衡效果较好。

优点：无须增加投资。缺点：由于系统检修、改造工作多在夏季进行，非常态运行方式在雷雨季节发生较多，消弧线圈频繁退出运行，对电网安全运行具有很大的隐患。

3）按《规程》规定调整消弧线圈档位。在增加系统运行线路长度时，先将消弧线圈档位调到合适位置上（由小调大），再投入线路。减少系统运行线路长度时（即退出线路），先退出线路，再将消弧线圈档位调到需要的新位置上（由大调小）。

优点：无须投资，只要消弧线圈容量许可，调整消弧线圈档位即可调整脱谐度，消除三相电压不平衡。缺点：老式消弧线圈需停电调分接头。但是由于油田电网运行方式变化频繁，无人值守变电所主控站与被控站距离较远，采取人工频繁调整消弧线圈分接头，并不符合生产实际。

4）采用自动跟踪消弧线圈。在实际运行中取得了较好效果，脱谐度基本控制在5%以内，从未发生过中性点位移电压过高的现象，很好地解决了脱谐度和中性点位移电压的矛盾。

优点：①自动跟踪消弧线圈在正常运行中每隔3 s对系统电容电流、残流进行测量计算，根据测量结果自动控制消弧线圈升降档，使残流（脱谐度）保持在最小。具有响应速度快、有载开关寿命长和跟踪准确的优点；②过补偿、欠补偿和最小残流3种运行方式任选，可在现场根据需要随时设定变更；③在最小残流方式下运行，可使补偿后的接地残流≤3%额定电流（使脱谐度保持在5%以内）；④消弧线圈串联电阻方式，可限制全补时中性点位移电压＜15%相电压，避免谐振，满足了运行规程要求。

结束语

本文分析了大庆油田电网无人值守变电所人工调谐消弧线圈的运行状况和存在的实际问题，在对比各解决方案后，认为方案1～方案3都存在局限性，无法根本解决无人值守变电所人工调谐消弧线圈在运行中暴露的问题。鉴于已投运自动跟踪消弧线圈的良好实际效果，在无人值守变电所加装自动跟踪消弧线圈，虽然投资大，却是解决实际问题的最好方案。EA

（收稿日期：2019.10.31）
（编辑：朱金凤）

推动产业链升级　助力可持续发展

2020中国（广东）－美国投资合作交流会9月16日在广州开幕。罗克韦尔自动化（中国）有限公司总裁石安等全球制造业领军企业负责人受邀出席，共同为广东推进先进制造业、粤港澳大湾区建设等献智献策。石安在发言中倡导中美企业加强智能化、数字化技术创新合作，推动广东制造业向世界产业链高端迈进，提升全球竞争力，为实现企业和城市的可持续发展添薪续力。

作为在粤经营逾20载的外资企业，石安认为，广东优越的营商环境和贸易便利环境为外资企业营造了良好的发展氛围。作为全球最大的致力于工业自动化、数字化转型和智能制造的百年企业之一，罗克韦尔自动化全力支持中国制造业的转型升级，通过本地创新，打造端到端、跨学科的IT/OT融合解决方案，聚焦于实现安全、节能、环保和高效的可持续性价值，提高中国制造业产业链的全球竞争力。