

[变电站]

# 35 kV变电站送电引起空母线谐振的原因及对策

文/赵利辉

黑龙江省大庆油田电力运维分公司油田配网调控中心

35 kV变电站全停改造完成或母线检修结束后，向10（6）kV母线合闸送电的过程中，由于系统电压升高，如果不尽快处理，往往会造成严重后果，轻则引起电压互感器熔体熔断，重则发生电压互感器烧毁、绝缘薄弱处闪络等情况，必须予以足够重视和防范，确保电网安全运行。

大庆油田电网因油而生，随油而兴，经过60多年的发展建设，形成了以110 kV系统为主供电网，35 kV系统为环网设计、开网运行的辐射供电网，10（6）kV系统为网格状辐射供电网，覆盖大庆油田及周边地区，现拥有280座35 kV变电站。近年来，随着油田产能建设，变电所一二次设备逐步更新替代，配电架空线路和电缆逐步改造，电网的参数不断变化。当变电站改造完成、电网检修结束时，充电后的10（6）kV母线就短时间变成了空母线，电网线路、母线等容性设备对地电容参数和电压互感器、所用变压器等感性负荷的参数达到了谐振的条件，由于系统电容有充电和放电的特性，电感有阻碍电流变化的特性，同时电感有电场和磁场相互转换的特性，此时电容和电感形成了LC振荡电路，使系统发生谐振现象，造成系统三相电压严重不平衡，还会发生虚幻接地现象，系统谐振产生的过电压往往会造成严重后果，轻则引起电压互感器一次熔体熔断，重则发生电压互感器烧毁、设备绝缘薄弱处闪络等情况，给调度人员及现场送电人员分析处置带来了难题，影响了变电站现场送电进程。

## 油田电网35 kV变电站送电时谐振的典型案例分析

油田电网部分35 kV变电站电气设备整体运行

年限较长，设备老化，由于运行年限长，断路器、隔离开关和电容器等设备故障率升高，缺陷逐年增多，常规的（10）6 kV GG1A型开关柜，其母线为外露双层结构，防护等级较低，易发生过热现象；断路器CD<sub>10</sub>电磁型操作机构，合闸电流大，易产生操作障碍，辅助开关动作可靠性降低；老式端子排安装不牢固、绝缘水平下降，存在开关误动作、拒动作风险，控保系统二次设备为老式电磁式继电器，具有保护灵敏度差、可靠性低、速度慢和误差大的缺点，大部分继电器外壳老化变形，存在裂纹以及机械结构卡涩情况，检修调试复杂；二次元件老化严重，存在触头粘连、易受振动造成误动作和节点腐蚀拒动作等问题，部分设备厂家已不存在，无备品备件，发生缺陷无法进行处理，为确保设备长周期稳定运行，逐年对变电站一二次设备进行更换，将GG1A型开关柜更换为KYN型小车开关型设备，将常规继电器保护装置更换为微机综合自动化保护装置。变电站一二次设备全停改造时，为确保油田产能不间断供电，对原变电站接带的线路、电动机等进行改线，由临时变压器进行供电，当改造完成送电时，由于6（10）kV母线所接带的线路、高压注水电动机等设备暂不具备转回条件，当主变压器送电后，6（10）kV母线就变成了空母线，达

到了谐振的条件,造成空母线谐振。

35 kV南四变电站建于1984年,主要担负着油田采油二厂产能建设供电任务,年供电量5 885万kW·h。该站为单母线分段接线,共有两条35 kV进线,站内两台主变压器均为8 000 kV·A,6 kV高压注水电动机3台、电容器2组、避雷器2组、电缆出线6条、电压

互感器2组、所用变压器2台和站库变压器7台。由于运行年限长,部分设备及元件老化,存在安全隐患,为确保可靠供电,对该变电所进行了综合自动化改造,并将6 kV设备更换为KYN型小车开关,2021年改造工程结束,验收合格。变电站接线如图1所示。

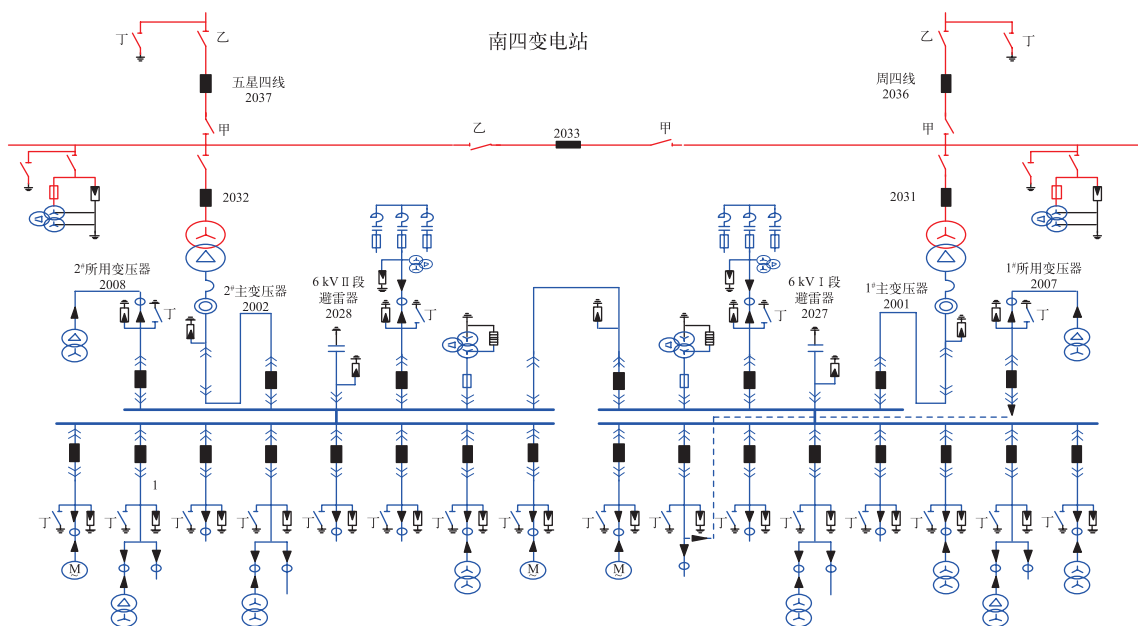


图1 35 kV南四变电站接线图

由于二厂产能供电不能中断,原变电站所接带的高压注水电动机、线路以及站库变压器等负荷由临时变压器接带,暂不能同步转回供电,仅所用变压器、避雷器及电压互感器具备送电条件,但是所用变压器低压负荷暂不能转回。现场送电过程中,35 kV两条进线、母线送电正常,并在35 kV五星四线2037开关处一次定相正确,合环一次。1#、2#主变压器充电30 min,主变运行正常,将6 kV两段母线电压互感器及避雷器小车插头推至运行位置,当1#主变压器低压侧2001开关合闸后,6 kV I段母线带电,变电所前台机发出“线路单相接地”报文,后台机显示“6 kV I段母线 $3U_0$ 越限”,检查三相电压不平衡,A相相电压达到2.3 kV,仅达到正常相电压的63.8%,降低较多;B、C相相电压均升高,B相电压4.9 kV,达到正常相电压的136.1%,B相电压6.2 kV,达到正常相电压的172.2%,升高较多。

因南四变电站6 kV一次设备更换为KYN型小车开关型设备,二次保护装置更换为大庆新世纪保护

装置,所有设备均已通过试验验收。现场送电人员经过详细检查设备,确认正常,由于此时6 kV I段母线仅接带 I 段电压互感器,相当于空母线,根据电压数值分析判断为空母线谐振现象,之后将6 kV母联03开关合闸,电压发生变化,6 kV两段母线三相相电压变化,各相相电压分别为A相2.9 kV、B相4.8 kV和C相5.7 kV,然后投入1#空载所用变压器、将6 kV I段母线避雷器小车插头遥至检修位置,6 kV I、II段母线三相电压恢复正常,在2#主变压器低压侧02小车开关进行一次定相正确。

为确保设备安全运行,根据设备检修规程规定,需要定期对设备进行各项试验,目前,变电所10 (6) kV母线及出线采取状态检修模式,按三年为一周期轮换检修,每年变电所母线检修结束后,在送电过程中也会发生短时空母线谐振现象。

系统正常运行时,在转移负荷操作、系统发生瞬间单相接地和故障线路跳闸等情况下,由于系统参数发生变化,经常会发生谐振现象,需要再找一

个合环开关进行操作, 改变系统参数, 消除谐振, 避免过电压或过电流造成电压互感器或绝缘薄弱点的绝缘击穿, 发生故障跳闸造成停电甩负荷事故的发生。

以上电网设备改造、系统瞬间单相接地以及倒闸操作等情况发生的空母线谐振, 均可以通过投停避雷器、所用变和投切母联开关进行合解环操作等方式, 改变系统电容、电感参数, 避免谐振的发生, 可以指导其他类似变电站现场送电时, 确保现场送电一次成功。

### 谐振的原因分析

35 kV 变电站 10 (6) kV 系统为中性点不接地系统, 母线通常接带采用  $Y_0$  接线的电磁式电压互感器, 电压互感器为感性设备, 其中性点是接地的; 配电线路、母线为容性设备, 接于电网中构成了并联电路, 等效电路图如图 2 所示。对于中性点不接地系统, 由于线路的有功损耗及线路相间电容较小, 可以忽略, 图 2 中,  $C_a$ 、 $C_b$  和  $C_c$  为每相母线及配电线路的对地电容;  $L_a$ 、 $L_b$  和  $L_c$  为每相电压互感器的铁心线圈的电感。当电网正常运行时或变压器对母线送电过程中, 电压互感器铁心是不饱和的, 线圈的感抗  $\omega L$  远远大于母线及线路的容抗  $\omega C$ , 两者并联后相当于一个等效的电容  $C$ , 此时系统网络对地阻抗仍呈容性, 三相基本是平衡的, 中性点的位移电压很小, 此时  $\omega L > 1 > \omega C$ 。

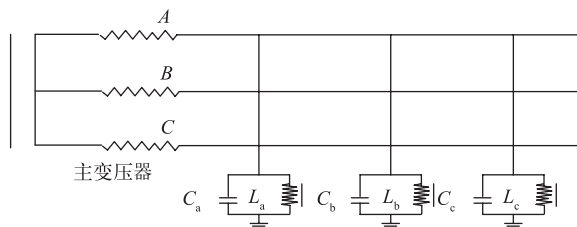


图2 变电站等值电路图

当加在电压互感器线圈上的电压增加时, 使得通过线圈的电流增大, 由于铁心电感的磁通和电流之间是线性关系, 如图 3 所示,  $a_1$  是稳定运行点, 此时电路呈感性, 电容、电感电压较低, 回路中电流较小;  $a_2$  是不稳定运行点, 系统产生微小的电压扰动, 使正常运行点发生偏移;  $a_3$  是稳定运行点, 此时回路呈容性, 电容、电感电压和电流急剧增大, 称为谐振的运行点, 也就是谐振点。当系统出现剧

烈的扰动时, 电压的突然升高导致铁心饱和, 使线圈的电感值由于铁心的饱和而不断下降, 当系统电压增大到一定的数值, 到达  $m$  点后, 回路中的电流由感性变为容性, 如果  $\omega L = 1/\omega C$ , 将进入谐振点, 激发谐振现象, 造成系统三相电压不平衡, 发生谐振过电压, 产生过电压与过电流, 且能够自我保持, 过电压损坏设备的绝缘结构, 给设备的安全运行带来隐患, 常常使电压互感器的一次熔体熔断, 严重时引发故障跳闸, 影响用户的供电。

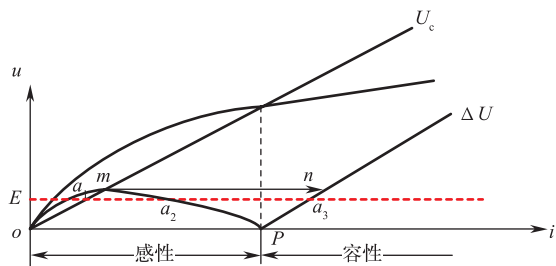


图3 谐振条件示意图

常见的使电压互感器铁心饱和的情况有以下几种。

1) 电压互感器的突然合闸送电, 使某一相或某两相线圈内产生较大的涌流, 铁心在大的涌流下饱和, 线圈的电感不断降低, 感抗逐渐接近系统容抗。

2) 由于雷击、树木等原因使配电线路发生瞬时单相接地弧光短路, 以及线路开关的突然开断等情况, 造成系统电压发生较大的扰动, 从而使非故障相电压突然升高或达到线电压, 当接地消失时故障相电压突然升高, 在电压互感器线圈上产生较大的涌流; 由于电压互感器铁心质量偏低、铁心截面积小或使用低质硅钢片等情况, 使得电压互感器工作在正常电压时, 互感器铁心工作点接近饱和区。

系统发生铁磁谐振时, 主要有以下三种情况。

1) 发生基频谐振时, 基频谐振的频率与电网频率相同, 三相电压的显示为两相升高、一相降低, 线电压正常, 伴有接地信号指示, 是虚幻接地现象, 此时查找故障原因时不易查找到故障点; 过电流较大, 导致电压互感器一二次熔体熔断, 严重时可能会烧毁电压互感器。

2) 发生分频谐振时, 电容和电感在振荡时能量交互所需的时间较长, 振荡频率较低, 过电压倍数

较低，三相电压同时升高，并周期性摆动，线电压正常。

3) 发生高频谐振时，线路的对地电容较小，振荡时能量交互较快，过电压倍数较高，三相电压同时升高，最大可达到4~5倍额定电压，线电压基本正常，过电流较小。

## 谐振的防范对策

变电站改造或检修结束送电时，由于负荷不能同步转回，系统母线对地电容和电压互感器参数达到谐振条件，造成系统三相电压不平衡，且伴有虚幻接地现象，给调度及运行人员的判断处理带来了困难，通过电网实际发生的南四变电站改造复役空母线时发生谐振，采取临时投入空载所用变压器、停用母线避雷器的方法，改变了系统参数，消除了谐振的发生，避免设备因过电压造成损坏，对于这种方式下的送电流程，可以采取以下几种措施。

1) 变电站一次设备改造设计时，设计人员应采用质量好、技术性能优和铁心不易饱和的电压互感器。在电网实际运行状态下，由于雷击或其他原因使线路发生瞬时单相弧光接地，此时非故障相电压突然升高到线电压数值，而故障相在接地消失的瞬间电压突然上升，产生较大的涌流，采用铁心不易饱和的电压互感器，可以有效抑制电压互感器铁心饱和情况的发生，抑制系统发生谐振。

2) 加强设备的维护和检修质量，确保断路器合闸操作三相同期性，减少单相接地事故的发生，采取线路整改措施，比如对线路杆塔、绝缘子和横担等进行消缺或更换，同时对线路走廊内的树木进行修剪或砍伐，消除可能引发单相接地故障的隐患。

3) 变电站改造过程中，应保证电容器、避雷器和所用变压器同步具备送电条件，以便采取投切避雷器、所用变压器的方法，改变系统参数，消除谐振现象的发生。

4) 改造送电前，应至少同步完成变电站所接带的其中一条线路的改造，并经验收合格，随时具备合闸送电条件，增加系统对地电容的参数，使系统不满足谐振的条件。

5) 注意停送电的操作顺序，母线停电时，应先

退出母线电压互感器，切除电感 $L$ ，再断开母线断路器，送电时与此相反。

6) 电压互感器操作时，应按照操作规程严格执行，当两段母线电压互感器并列操作时，如果母联开关在开位应先合上，使两段母线并列运行，然后再并列二次侧。正常运行时，电压互感器二次侧不允许并列运行。

7) 在10(6) kV母线电压互感器开口三角加装微机消谐装置，当母线送电时发生空母线谐振，微机消谐装置内部的单片机动作，发出高频脉冲群，使开口三角处的晶闸管交替过零触发导通，迅速消除过电压，避免电压互感器铁心的饱和。

8) 投切母线接带的所用变压器、避雷器，改变系统电容、电感参数，消除谐振的发生。

9) 电网正常运行时，因瞬间单相接地消失、线路突然故障跳闸等原因引起的电压突然升高的谐振现象，调度人员应通过投切母联开关、再找一个合环开关处进行操作和投切所用变压器等方式，改变系统参数，释放谐振能量，消除谐振对电网的影响。

## 结束语

35 kV变电站全停改造或半段母线检修后的送电时，由于线路负荷不能同步送电，系统电容和电感参数达到谐振的条件，造成系统三相电压不平衡，一相降低，其他两相电压升高，最大达到线电压，给设备安全运行带来隐患，调度和运行人员应尽快采取措施，改变系统运行方式，消除或避免谐振的发生，确保电气设备的安全稳定运行。

(收稿日期：2022-10-10)

## 参考文献

- [1] 高元楷. 电力系统运行操作和计算[M]. 辽宁：辽宁科学技术出版社，1996.
- [2] 武娟. 电力系统分析[M]. 北京：中国电力出版社，2020.
- [3] 王小坤. 牵引变电所用变压器高次谐波治理装置运行效果评价[J]. 电气应用，2020，39(12): 74-78.