

[光伏电站]

集中式光伏电站验收常见问题与分析

文/战祥建
中油电能供电公司杏南运维部

光伏电站是指利用太阳光能，采用特殊材料（诸如晶硅板、逆变器等电子元件）组成的发电体系，与传统变电站相比较，一次设备结构相似，二次保护系统功能齐全，是今后油田电网发展的方向。

光伏电站是指利用太阳光能，采用特殊材料（诸如晶硅板、逆变器等电子元件）组成的发电体系，是一种与电网相连并向电网输送电力的光伏发电系统。光伏电站可以分为带蓄电池的独立发电系统和不带蓄电池的并网发电系统。太阳能发电分为光热发电和光伏发电。光伏电站是属于国家鼓励力度最大的绿色电力开发能源项目。近年来，大庆油田新能源产业进入高速增长期，已并网和即将并网的光伏电站近十余个。2022年7月1日，中国石油首个水面光伏项目——大庆油田星火水面光伏示范工程并网发电，标志着大庆油田新能源业务并入主业发展全面提速。光伏电站与传统变电站相比较，一次设备结构相似，二次保护系统功能齐全，变电检修人员在验收送电过程中，从设计到施工，从安装到调试验收各环节进行总结，共计汇总如下几类问题。

10 kV母差保护

母线大差是指除母联开关和分段开关外所有支路电流所构成的差动回路。母线小差是指该段母线上所连接的所有支路（包括母联和分段开关）电流所构成的差动回路。母线大差比率差动用于判别母线区内和区外故障，小差比率差动用于故障母线的选择。

昌盛光伏电站10 kV母差装置内部显示如图1所示。

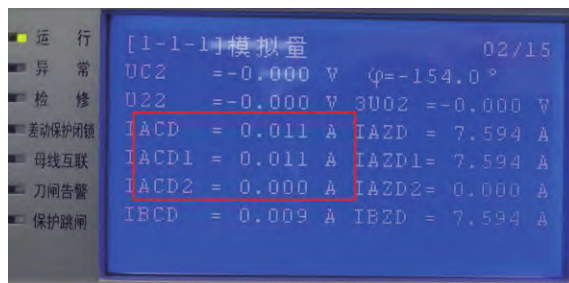


图1 母差保护装置差流显示

图1中，IACD为A相电流大差值；IACD1为10 kV I段母线A相电流小差值；IACD2为10 kV II段母线A相电流小差值。因昌盛光伏电站10 kV为单母线运行方式，故IACD=IACD1。母差保护动作后，切除母线所有开关。

昌盛光伏电站10 kV母线共接入5回线，其中集电线1、2为电源输入端，接地变压器、SVG及01开关为负载端，其中SVG静止动态无功补偿装置可以发容性或感性无功。光伏电站一次系统接线图如图2所示。

1[#]、2[#]集电线为电源端，输入电流；接地变压器、SVG及74001开关为负载端，输出电流；依据支路电流法计算 $I_1+I_2=I_3+I_4+I_5$ ，总流入电流等于总

流出电流。其中 I_5 电流经过升压变压器接入杏南一次变35 kV母线系统，直接供电给下级各路电动机等感性负载。 I_3 接地变压器（兼站用变压器）为感性负载，SVG可发感性无功也可发容性无功（常态为发容性无功，补偿无功消耗，提升功率因数）。

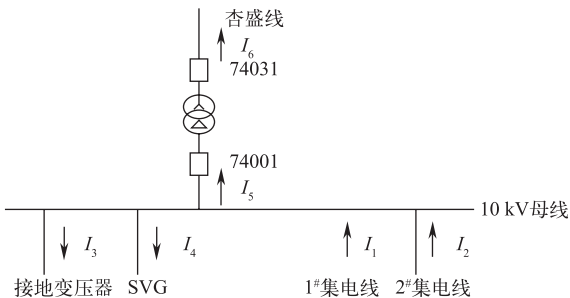


图2 光伏电站一次系统接线图

10 kV母线所有支路电流互感器极性均以10 kV母线为正方向，正极性引出电流。现场测得10 kV母差相位角度见表1。

表1 10 kV母差各支路相位表

10 kV线	基准电压 U_{AB}/V		100			
	I_A		I_B		I_C	
	幅值/A	相位 (°)	幅值/A	相位 (°)	幅值/A	相位 (°)
74001开关	3.59	30.8	3.59	150.6	3.59	270.8
1#集电线	2.42	205	2.42	324	2.42	85
2#集电线	2.42	205	2.42	324	2.42	85
接地变压器	0.012	33	0.012	160	0.012	279
SVG (发0.3)	0.15	299	0.15	60	0.15	180
SVG (发1.5)	0.69	299	0.69	60	0.69	180
SVG (发感1)	0.48	118	0.48	240	0.48	359
SVG (发感2)	1.25	118	1.25	240	1.25	359

接地变压器与74001开关均为感性负载，角度大致相同，有误差的原因为接地变压器负载电流较低（二次值为0.012 A）。

接地变压器、74001开关与1#、2#集电线同相电流角度相差175°左右（接近于180°反向），电流互感器极性正确。

通过相位图可以判断，SVG发容时， I_A 相电流超前 U_A 相电压90°；SVG发感时， I_A 相电流滞后 U_A 相电压90°， I_B 、 I_C 亦如此，符合在感性负载中，电

压超前于电流，在容性负载中，电流超前于电压。

系统无功补偿

在光伏电站中，无功补偿装置是不可缺少的一部分。作为无功补偿装置之一的SVG，能够使用动态无功补偿要求，同时可以消除高次谐波对电网的影响，为光伏电站的稳定运行提供保障。

光伏电站为何需要无功补偿？当光伏电站接入电网容量过大时，并网电压容易超过规定范围，不利于系统电网电压的稳定。而且光伏电站并网点的有功输出，还会受到光照、温度等因素的影响。一旦电网的运行出现问题，并网点的电压都会受到影响。因此在光伏电站中安装无功补偿装置，可以起到很好的保障作用。

光伏电站使用SVG的好处为：

- 1) 提高光伏发电的效率。安装SVG进行无功补偿，可以减少逆变器的无功输出，消除高次谐波，提高设备转化效率，进而提高光伏发电量。
- 2) 降低线路损耗。安装SVG可以提高电网功率因数，降低供电线路的损耗。
- 3) 改善电能质量。在光伏发电站安装SVG进行补偿，能够补偿无功功率，减少逆变器无功功率的产生，进而改善电能质量。

在电网系统中，SVG可以起到抑制电压波动、提高功率因数的作用，为电网稳定运行提供保障。因此，在光伏发电站中进行无功补偿具有重要意义。

以昌盛光伏电站为例，当SVG发容0.32 Mvar时，35 kV杏盛线从上级杏南一次变系统吸收无功功率为3.48 Mvar。

1#、2#集电线通过计算合计消耗无功功率为1.8 Mvar，SVG若发0.32 Mvar无功功率，74001开关吸收1.48 Mvar无功功率，刚好补偿1#、2#集电线。 Q_1 集电线+ Q_2 集电线=1.8 Mvar= $Q_{74001}+Q_{SVG}=(1.48+0.32)$ Mvar。

变压器消耗的无功功率一般约为其额定容量的10%~15%。若按照10%计算，昌盛光伏电站升压变压器容量为20 000 kV·A，约等于2 Mvar，因此74031开关显示吸收3.48 Mvar无功功率，等于74001开关吸收1.48 Mvar加上变压器本身消耗的2 Mvar无功功率。

功率因数计算：以SVG发0.32 Mvar无功功率计算，杏盛线有功 P 为21.16 MW，无功 Q 为吸收3.48 Mvar，视在功率 S 为21.44 MV·A，功率因数 $\cos\phi=P/S=0.986$ 。

以SVG发2.23 Mvar无功功率计算，杏盛线有功 P 为21.24 MW，无功 Q 为吸收1.34 Mvar，视在功率 S 为21.28 MV·A，功率因数 $\cos\phi=P/S=0.998$ 。

其中74001开关向升压变压器反送0.61 Mvar无功功率，杏盛线从系统吸收1.34 Mvar无功功率，升压变压器消耗1.95 Mvar，约等于2 Mvar的无功。

电网中的电力负载（如电动机、变压器等）大部分属于感性负载，在运行过程中需向这些设备提供相应的无功功率。安装无功补偿设备后，可以提供感性负载所消耗的无功功率，减少了电网电源向感性负载提供、由线路输送的无功功率。由于减少了无功功率在电网中的流动，因此可以降低线路和变压器因输送无功功率造成的电能损耗。

光纤纵差极性

光伏电站一次系统接线图如图3所示。

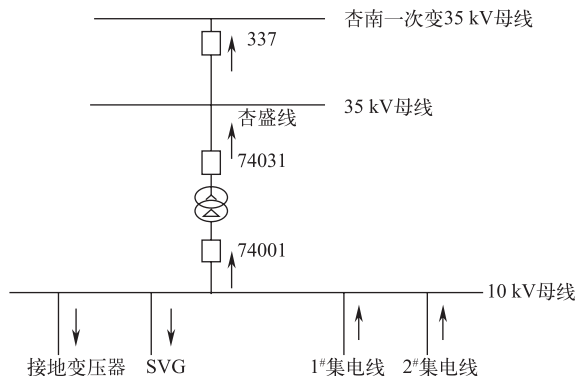


图3 光伏电站一次系统接线图

1. 光纤纵差极性

由于昌盛光伏电站35 kV没有进线开关，仅有主变压器高压侧31开关，因此光纤纵差保护电流取自74031开关电流互感器。杏南一次主变压器杏盛线337开关光纤纵差保护一次以35 kV母线为正，二次正引出；若光伏电站侧74031开关光纤纵差保护绕组一次以35 kV母线侧为正，二次正引出，则将会导致光纤纵差两侧开关均以同一方向为正，产生差流。因此昌盛光伏电站74031开关光纤纵差保护绕组一次要以主变压器侧为正，二次正引出。

74031开关主变压器差动绕组一次仍然以35 kV母线侧为正，二次正引出。

若74031开关设置在光伏电站进线侧，没有主变压器35 kV侧开关，则光纤纵差及主变压器差动绕组极性与上述情况相反。

若光伏电站有35 kV进线开关74036，还有主变高压侧开关74031，则光纤纵差保护取自74036互感器，一次以光伏电站35 kV母线为正，二次正引出。

2. 10 kV母差极性

10 kV母线所有支路开关电流互感器一次极性均以10 kV母线为正方向，二次正极性引出电流。从表1可以看出，接地变压器与74001开关均为感性负载，角度大致相同。接地变压器、74001开关与1#、2#集电线同相电流角度相差175°左右（接近于180°反向），电流互感器极性正确。

微机装置基准CT

对10 kV母差回路测相位过程中发现，10 kV母差保护装置显示74001开关二次电流与测相位时测得的二次回路电流相同，其余10 kV母线分支回路装置显示电流与二次回路实测电流均不相同。

随着近些年光伏、风电等新能源的快速发展，相关技术规范也不断更新。母线保护应允许使用不同电流比TA，通过装置软件自动校正，并适应于各支路TA电流比差不大于10倍的情况。而油田大部分在用变电所的35 kV母差保护中，各支路TA电流比均相同，不需要装置软件自动校正。

查阅下发的10 kV母差保护定值：保护设备为10 kV母差；装置名称为差动；电流比为1 600/5（主变压器10 kV侧开关74001，基准TA）；600/5（接地变压器74006、SVG线74009）；1 200/5（1#、2#集电线74011、74012）。

装置显示及二次回路测得的电流值对比见表2。

表2 母差保护装置电流对比表

支路名称	名称	装置显示 电流/A	二次实测电流/ A
2	主变压器低压侧	3.3	3.3
4	1#集电线	1.6	2.2
5	2#集电线	1.6	2.2
7	接地变压器	0	0.014
8	SVG无功补偿装置	0.4	1.14

以主变压器10 kV侧74001开关互感器1 600/5为基准TA，其他各支路互感器电流比虽不相同，但可以通过软件进行自动校正计算。

1) 两条集电线互感器电流比为1 200/5=240，基准TA电流比为1 600/5=320，集电线二次回路测得电流值为2.2 A，通过软件校正， $240/320 \times 2.2 \text{ A} = 1.65 \text{ A}$ ，接近于装置显示1.6 A。

2) SVG互感器电流比为600/5=120，基准TA电流比为1 600/5=320，SVG二次回路测得电流值为1.14 A，通过软件校正， $120/320 \times 1.14 \text{ A} = 0.4275 \text{ A}$ ，接近于装置显示0.4 A。

3) 接地变压器负载电流较低，互感器电流比为600/5=120，基准TA电流比为1 600/5=320，二测测得电流值为0.014 A，通过软件校正， $120/320 \times 0.014 \text{ A} = 0.00525 \text{ A}$ ，接近于0。

10 kV母差互感器电流比不同，通过软件进行校正，相似于主变压器差动保护中由于高低压侧互感器接线方式不同、电流比不同而引起的差流，通过软件系数校正后再同相作差流并进行判断，从而保证继电保护装置动作的正确性。

一次电缆相序

昌隆光伏电站接入南五一次变35 kV系统，外线部分配置架空线路、电缆等设备，光纤纵差保护两侧电流互感器一次各自以本侧电源为正，二次正引出，光纤纵差保护装置两侧同相电流应互差180°，三相正相序接入。

该光伏电站并网后检查发现光纤纵差通道内本侧和对侧电流角度不正常。具体如图4所示。



图4 光纤纵差装置电流量图

通过图4可以看出，光伏电站本侧三相电流正相序，对侧三相电流正相序，但是同相电流不相差180°，而是有60°角差，光纤纵差保护产生差流，具体如图5所示。

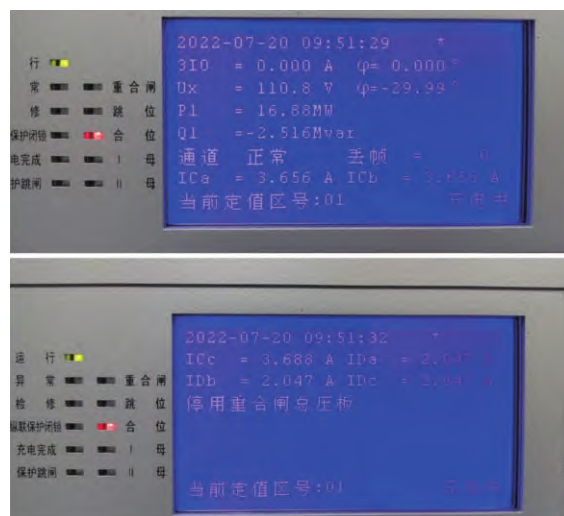


图5 光纤纵差装置差流显示图

图5中，差流 $I_{Ca} = 3.656 \text{ A}$ ；制动电流 $I_{Da} = 2.047 \text{ A}$ 。差流 $I_{Cb} = 3.656 \text{ A}$ ；制动电流 $I_{Db} = 2.047 \text{ A}$ 。差流 $I_{Cc} = 3.688 \text{ A}$ ；制动电流 $I_{Dc} = 2.047 \text{ A}$ 。

通过画六角图可以分析，本侧与对侧同相电流互差60°，差流等于本侧或对侧电流幅值的 $\sqrt{3}$ 倍，装置差流计算正确。通过图6分析本侧与对侧各项电流角度发现，本侧A相与对侧C相电流角度相差接近于180°，本侧B相与对侧A相电流角度相差接近于180°，本侧C相与对侧B相电流角度相差接近于180°。将该光伏电站停运，从上级变电所进线电缆侧至光伏进线电缆侧（含中间架空线路部分）逐一校正一次相序，发现电缆三相相序依次接错，经过调整送电后，各项数据均恢复正常。

结束语

随着新能源项目的陆续投产发电，大庆油田助力集团清洁能源规模化发展的目标也将越来越近，电力人将继续在新能源发展道路上探索检修、验收各项技术标准，保证油田电网发、变、输各环节可靠运行。EA

(收稿日期：2022-08-19)