

光伏电站系统效率诊断技术及应用

韩 广

中国大唐集团科学技术研究总院有限公司中南电力试验研究院 河南郑州 45000

摘要: 本文通过介绍某光伏电站系统效率下降的案例,从影响光伏发电系统效率因素的角度出发,分析组件性能、逆变器性能、电缆损耗、变压器损耗等参数。依据各影响因素的数据分析结果,进一步得出对类似电站系统效率异常分析具有指导意义。

关键词: 组件性能;逆变器性能;电缆损耗;变压器损耗

1. 光伏电站系统介绍

一般并网光伏发电系统由光伏组件、汇流箱、逆变器、变压器及监控系统组成。其工作原理是,太阳辐射能量经过光伏组件转换后,由汇流箱汇流至箱逆变一体机或者经组串式逆变器接入变压器,经变压器升压并入电网。

2. 光伏电站效率

光伏电站效率诊断包括光伏组件性能、串并联失配率、线缆损耗、光伏逆变器转换效率及变压器效率等。

2.1 组件性能评估

组件性能评估主要是通过功率衰减测试、电致发光测试检查组件性能是否完好,评估组串功率衰减对电站发电性能的影响权重。

$$P_x = (P_c \times (Q_x / Q_c) + \delta(T_x - T_i)) \times P_{\max,STC} \quad (1)$$

修正功率 P_x , 实测功率 P_c , 测试结温 T_j , 测试光强 Q_c , 修正结温 T_x , 修正光强 Q_x , 标准测试条件峰值功率 $P_{\max,STC}$ 。

电致发光测试检查裂纹、断栅、实心黑等缺陷,是在工程实际应用中非常简单、方便、快捷的手段,能够发现我们无法肉眼看清的缺陷。

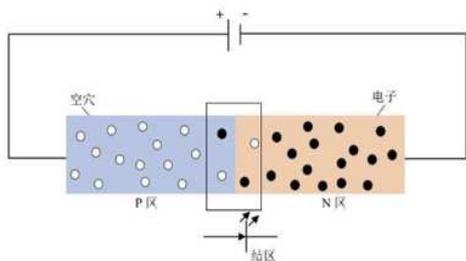


图 1 电致发光原理图

2.2 逆变器性能评估

逆变器的性能评估主要是通过逆变器的功率一致性、转换效率、逆变器的运行温度等参数来检验。

对功率一致性、转换效率差值引入 t 统计量,设 x_1, x_2, \dots, x_n 是来自正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 的样本,则有:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, t = (\bar{x} - \mu) \left(\frac{S}{\sqrt{n}} \right)^{-1} \quad (2)$$

式中, \bar{x} 为样本均值, S^2 为样本方差, S 为样本标准差, t 为根据样本计算的检验统计量, x_i 为第 i 个样本个体, μ 为假设的所有逆变器功率平均均值, n 为逆变器数量。

对逆变器的功率一致性、转换效率进行 T 检验, P 值作为统计值。选择 0.05 作为显著性水平,若 P 值明显小于 0.05,则认为该逆变器的实际能效存在显著异常,此逆变器的能效水平较低。

此外,逆变器的环境温度与额定功率也有密切的关联,可通过多项式回归模型构造目标函数 (3),并将拟合的温度降额曲线与逆变器实际运行温度曲线对比,识别误差是否超出范围。

使用最小二乘法来估计模型构造目标函数:

$$S(\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n) = \sum_{i=1}^m (y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \dots + \beta_n x_i^n))^2 \quad (3)$$

其中 m 为样本数量, y_i 和 x_i 分别为第 i 个观测的因变量和自变量的值。

2.3 电缆损耗评估

电缆损耗评估是根据《电气设计一次手册》中提供的直流、交流电缆压降公式 [2] 分别为式 (4)、式 (4):

$$\text{直流线路 } \Delta U(\theta/\theta_0) = \frac{I_0}{U} I_0 L R \quad (4)$$

$$\Delta U = \frac{I^2 R}{U} + \frac{I^2 X}{U} \cos \phi + \frac{I^2 X}{U} \sin \phi \quad (5)$$

式中： ΔU : 电压压降百分比 (%)； I : 电流 (A)； L : 电缆长度 (km)； R : 直流电缆阻抗 (Ω/km)； γ : 交流电缆阻抗 (Ω/km)； x : 交流电缆电抗 (Ω/km)； ϕ : 功率因数，逆变器出口交流电源 $\cos \phi$ 取 1。

当环境温度、辐照值变化时，光伏组件的工作电压、电流随之变化，进而引起光伏阵列内电缆压降的变化。为简化计算模型，假设光伏组件为恒定的电流源，即光伏组件的工作电压恒定，仅工作电流随环境参数变化。

2.4 箱变损耗评估

变压器损耗是由变压器铁损耗、铜损耗及杂散损耗组成。变压器的铁损耗和铜损耗占到变压器损耗的 90% 以上，杂散损耗暂不考虑。

对比场站箱式变压器交接试验、年度预试数据，将绕组的直流电阻测量值经过式

$$R_2 = R_1 \left(\frac{T+t_2}{T+t_1} \right)^{2.3} \quad (6)$$

式中 R_1 、 R_2 — 在温度 t_1 、 t_2 时的电阻值； T — 常数，铜导线取 235，铝导线取 225。

在功率因数一定时，变压器的效率与负载系数之间的关系：

$$\eta = \frac{\beta S_N \cos \phi_2}{\beta S_N \cos \phi_2 + P_0 + \beta^2 P_{kn}} \times 100\% \quad (7)$$

变压器的效率特性曲线，如图 2 所示。

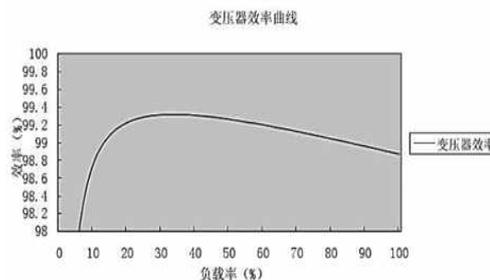


图 2 变压器效率特性曲线

3. 光伏电站效率诊断评估实例

某光伏电站装机容量为 73.2MW_p/55.27MW，安装了 136264 块 535W_p 单晶硅双面光伏发电组件和 282 台组串式逆变器。2023 年 1-6 月份电站总辐射量 623.04kWh/m²，年利用小时数 517.84h，损失电量 171.33 万千瓦时（折合 23.41h），电站系统平均效率为 83.10%，2024 年 1-6 月份总辐射量 541.72kWh/m²，年利用小时数 434.69h，损失电量 123.96 万千瓦时（折合 16.93h），电站系统平均效率为 80.23%。

3.1 光伏组件 IV 衰减检测

根据组件产品说明书首年衰减 2%，2-30 年衰减为 0.45% 考虑，即 2024 年因组件衰减因素影响发电量应为 14.83 万千瓦时。

现场随机抽检 8 块组件开展组件 IV 功率衰减测试，其中 1-4 号组件为清洗后组件，5-8 号组件为未清洗组件，下表为电站组件功率衰减测试数据。

表 1 组件功率衰减现场检测数据

序号	标称功率 (W)	Pmp (W)	STC 功率 (W)	组件功率衰减 (%)	序号	标称功率 (W)	Pmp (W)	STC 功率 (W)	组件功率衰减 (%)
1	535	371.44	475.10	11.20	5	535	210.44	528.62	1.19
2	535	375.30	470.64	12.03	6	535	208.17	524.80	1.91
3	535	376.70	475.39	11.14	7	535	203.47	521.58	2.51
4	535	388.54	491.10	8.21	8	535	199.56	525.55	1.77

从上述功率衰减检测数据可以看出，清洗后的组件功率衰减最大值为 2.51%，最小值为 1.19%。未清洗的组件功率衰减最大值为 12.03%，最小值为 8.21%。说明组件灰尘、鸟粪、组件自身质量对组件的功率影响较大，可能是导致系

统效率下降的主要因素。

3.2 光伏组件 EL 特性检测

为了进一步确认 3.1 节选取的 8 块组件性能，现场对组件开展电致发光检测，下图 3 为组件电致发光检测图像。

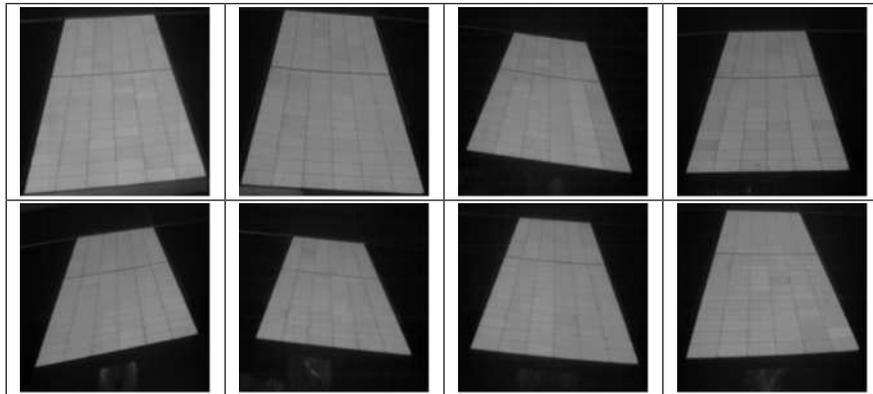


图3 组件电致发光图像

从图3可以看出,8块光伏组件未发现电池片隐裂、背板划伤等现象。说明组件质量良好,未发生隐裂、背板划伤、PID 衰减等现象,组件衰减超出允许值是由于组件表面未清洁造成的。

3.3 逆变器性能诊断

根据2.2节逆变器性能评估方法,对电站282台逆变器开展逆变器性能诊断。

通过监测逆变器转换效率数据,我们绘制了每台逆变器转换效率曲线,如图4所示。逆变器转换效率最大值为98.99%,最小值为98.31%,说明逆变器转换效率是满足要求的。

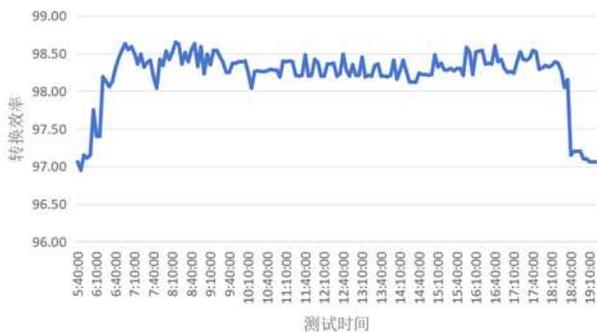


图4 逆变器的转换效率曲线

利用公式(2)判定逆变器的功率一致性检验,发现有48台逆变器的显著水平超出0.05,即认为该48台逆变器的实际能效存在显著异常,逆变器的能效水平较低。

在逆变器运行时,假定组串工作正常,则逆变器在不同的环境温度、辐照条件下,对应了不同的温度曲线。通过公式(4)拟合运行中的逆变器温度降额曲线如图5所示。通过统计分析,发现有49台逆变器发生了逆变器功率自降

现象,其中直流输入功率同比偏差最大值为30kW,发生在2024年5月1日至2024年6月23日期间。经统计分析发现,此49台逆变器平均运行温度较去年同期高9.7℃,现场检查逆变器周围存在树木遮挡的为40台,逆变器滤网堵塞的为9台。在2024年6月24日处理完之后,逆变器的功率一致性较好,说明树木遮挡、滤网堵塞导致逆变器散热效果差,进而导致逆变器自降功率。

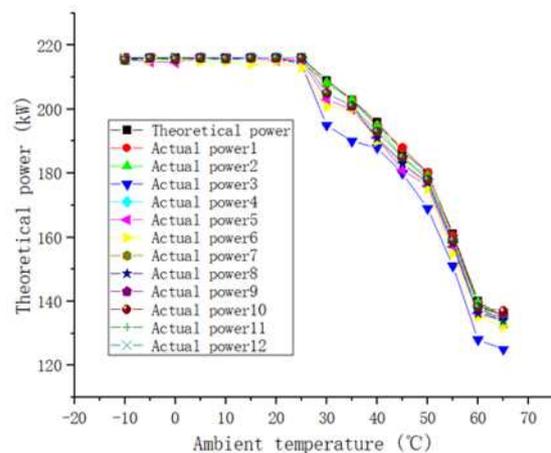


图5 逆变器温度降额曲线

3.4 电缆损耗分析

为简单计算,取光伏组件为稳定的电流源。获取光伏电站系统特征参数:光伏组件为575W组件,其中 $V_{mp}=43.11V$, $I_{mp}=13.34A$;组件数量为28,每台逆变器组串接入数为12,组件至逆变器电缆采用PV1-F-0.9/1.8kV-1*4mm²;逆变器至箱变低压侧电缆采用ZRC-YJLV23-1.8/3KV-3*120mm²。

直流线路最大值为1.94%,交流线路1.35%,电缆损耗

值在允许范围内，电缆损耗不是电站效率下降的主要原因。

3.5 箱变损耗评估

对比场站箱式变压器 2023 年、2024 年检修预试数据，将电站所有箱变绕组的直流电阻测量值经过式 (7) 换算后相间差别不大于三相平均值的 2%，与初值差不大于 2%，说明电站箱变的绕组正常。

为更准确掌握箱变损耗值，可通过变压器的效率与负载系数值关系得到，统计 2023 年及 2024 年 1-6 月变压器不同负载的时长。

表 2 变压器不同负载的时长

序号	2023 年 1-6 月负载时长		2024 年 1-6 月负载时长	
	负载率	时长	负载率	时长
1	5	5.1784	5	4.3469
2	10	10.3568	10	13.0407
3	20	20.7136	20	17.3876
4	30	46.6056	30	43.469
5	50	93.2112	50	95.6318
6	65	72.4976	65	52.1628
7	75	88.0328	75	65.2035
8	100	181.244	100	143.4477

2023 年变压器平均负载率为 0.696，2024 年变压器平均负载率为 0.672。从变压器效率曲线图中可知，变压器损耗对电站效率下降影响较小。

4. 结论

通过上述案例的分析，我们发现光伏电站系统效率异常主要的原因是由组件性能、外部遮挡、逆变器性能等主要因素决定，而电缆、变压器等设备在投入运行后，损耗相对稳定：

4.1 组件表面脏污

灰尘主要影响太阳能组件的短路电流，随着灰尘的增加，太阳能组件的短路电流会迅速减小，而开路电压则减小较慢。灰尘密度与太阳能组件的效率损失并不呈现简单的线性关系，在不同的密度变化区间，损失效率的变化的程度并不相同。在开始灰尘较少时，效率损失的增速较快；当灰尘密度增大到一定程度时，效率损失的增速变小。

4.2 组件衰减

组件的衰退特性可归结为透光率 τ 降低、串联电阻 R_s 增加和并联电阻 R_{sh} 减小。透光率 τ 的降低是短路电流 I_{sc} 减小的主要原因，而串联电阻 R_s 的增大和并联电阻 R_{sh} 的减小则导致了填充因子 FF 减小。该电站已投运 2 年，根据组件产品说明书首年衰减 2.0%，第 2-30 年 0.45%/年，即当前组件实际功率约为 526.77W。

4.3 阴影遮挡

根据现场试验数据显示，局域遮挡对组件的功率影响重大，500W/m² 辐照条件下，当单片电池全遮挡时，遮挡引发的功率损失率达 32.34%；250W/m² 辐照条件下，当单片电池全遮挡时，总功率损失率达 29.22%。组件出现局部遮挡会使组件温度升高，输出功率下降，温度每升高 1℃，其输出功率降低 0.35%。辐照度越大，组件的总功率损失值越大，损失率也越大。遮挡比例相同时，辐照度越大功率损失越大，因为电流越大，线路电阻损耗的功率越大。

4.4 逆变器散热通道阻塞

逆变器安装位置不当易导致逆变器散热通道阻塞，根据逆变器温度降额去曲线图可知，当逆变器的环境温度达到 40℃时，逆变器功率最大可达 196kW，当环境温度上升 10℃时逆变器功率最大值仅为 180kW 左右。同时，逆变器为户外设备，长期未清理滤网会造成散热通道阻塞，进而造成逆变器运行温度较正常值偏高，也会导致逆变器功率下降。

参考文献：

- [1]CNC ACTS0016-2015 并网光伏电站性能检测与质量评估技术规范.[S].
- [2]水利电力部西北电力设计院.电气设计一次手册[M].中国电力出版社,1986.
- [3]DLT 596-2021 电力设备预防性试验规程.[S].
- [4]华跃刚.变压器经济运行曲线的分析与选择.[J]电测与仪表,2018,55(20):72-75.

作者简介：

韩广(1986-),男,汉族,广东深圳,硕士,高级工程师,从事光伏检测、技术监督、科研工作。