

# 光伏发电系统无功分布计算及无功补偿装置优化运行分析

## Calculation of Reactive Power Distribution in Photovoltaic Power Generation System and Analysis of Optimal Operation of Reactive Power Compensation Device

杨光

Guang Yang

国家电投集团江西中业兴达电力实业有限公司 中国·江西 南昌 330096

State Power Investment Group Jiangxi Zhongye Xingda Electric Power Industry Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi, 330096, China

**摘要:** 光伏电站日常负荷较小, 高压电气设备无功损耗较大, 功率因数很低, 产生额外力调电费。为了避免力调电费必须补偿无功, 如果无功补偿能耗也会提高运营成本, 所以如何优化 SVG 运行成为光伏发电企业必须研究的问题。

**Abstract:** The daily load of photovoltaic power station is small, the reactive power loss of high-voltage electrical equipment is large, and the power factor is very low, resulting in extra power regulation charges. In order to avoid power regulation, reactive power must be compensated. If reactive power is compensated for energy consumption, it will also increase operating costs. So how to optimize SVG operation has become a problem that photovoltaic power generation enterprises must study.

**关键词:** SVG; 动态无功补偿; 运行成本

**Keywords:** SVG; dynamic reactive compensation; operating costs

**DOI:** 10.12346/etr.v4i12.7419

## 1 引言

提质增效是所有企业提出的一项重要的战略性任务要求, 坚持效益优先, 全力提升存量资产管理质量和收益水平, 加快新能源项目发展, 要求努力实现新能源提质增效加速释放产能, 也是“十四五”期间中央企业要做好的头号任务。“碳中和碳达峰”以来, 光伏等新能源发电近几年迎来了爆炸式发展。集电线路参数及变压器数量决定补偿量(夜晚), 各光伏场站可研时未考虑线路容性无功与设备感性无功平衡, 单只无功补偿量配置有较大的偏差。目前, 光伏场站配有关口表, 但绝大部分电费结算计量点设在出线对侧变电站侧, 无法覆盖补偿外送线路感性无功损耗, 同时光伏发电系统存在多台箱变, 消耗大量容性无功。由于以上原因, 最终导致很多光伏场站不进行无功补偿则产生大额力调电费, 若无功补偿时, 增加厂用电, 如何优化无功补偿装置经济运行势在必行。

## 2 实例背景

黄柏光伏电站是一座 16MW 的小型光伏电站, 站内配

置有 1 台  $\pm 6\text{Mvar}$  的 SVG 无功补偿设备、1 台 SVG 降压变、16 台 1MW 的箱变和逆变器。光伏组件所发的电能从升压站输出, 通过 1.2km 35kV 架空输电线路接入电网公司 35kV 黄柏变电站。

## 3 SVG 四象限运行特性

当前, 国家“3060”碳达峰碳中和任务目标在即, 光伏发电正高速发展, 光伏发电、清洁能源占比不断提高, 但同时也增加了电力系统的无功冲击、电压波动等诸多新问题。光照强度、灰尘遮挡、温度变化等环境因素通过影响光伏组件发电出力诱发系统电压波动, 随着光伏发电的容量占比逐渐递增, 必将影响电网运行的可靠性, 大型光伏电站必须具备一定的无功补偿能力。

大部分光伏场站通过无 SVG 完成无功补偿, SVG 在电路结构上实质上是电能能量双向流动的 PWM 四象限运行变流器, 当 PWM 变流器从电网吸收电能时, 其运行于整流工作状态; 当 PWM 变流器向电网输送电能时, 其运行有源逆

【作者简介】杨光(1993-), 男, 中国辽宁喀左人, 本科, 从事光伏发电研究。

变工作状态。根据国家标准，光伏场站电能表采用四象限制计量，其电能计量四象限制运行特性如图 1 所示。

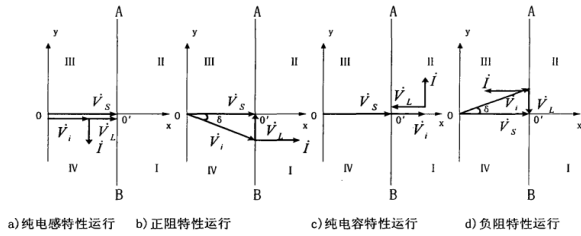


图 1 电能计量四象限

变流器交流测矢量关系如图 2 所示，在 x—y 平面上，电源电压矢量  $U_s$ 、固定为  $OO'$  不变，电感电压  $U=U_s-U_i$ ，忽略交流侧电阻时， $U_i=J\omega I$ ，所以电流  $I$  始终垂直  $U_i$ ，过  $O'$  做垂直于 X 轴的直线 AB，AB 将和 X 轴一起将 x—y 分为 I、II、III、IV 四个区间，电压矢量  $V_i$  的始点为坐标原点 0， $V_i$  的端点在 I、II、III、IV 四个区间运动时，PWM 变流器交流侧电流  $I$  在四象限区间运行。

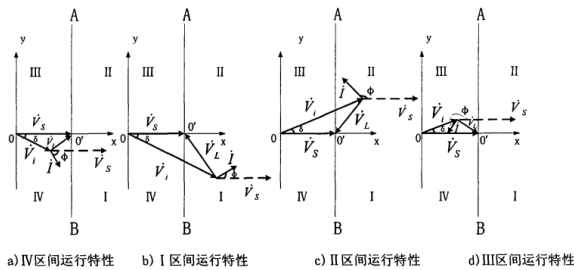


图 2 PWM 四象限态矢量关系

期间变流器交流侧电压  $V_i$  与电网电压  $V_s$  的夹角为  $\phi$ ， $\phi$  的范围为  $-\frac{\pi}{2} \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$ ，电流  $I$  与  $U_s$  的夹角为  $\phi$ ， $\phi$  的范围为  $-\frac{\pi}{2} \leq \frac{3\pi}{2}$ ，PWM 变流器四象限运行规律如下：

- I 象限：输入有功功率，输入无功功率，为阻感性负荷；
- II 象限：输出有功功率，输入无功功率，发出容性无功；
- III 象限：输出有功功率，输出无功功率，发出感性无功；
- IV 象限：输入有功功率，输出无功功率，为阻容性负荷<sup>[1]</sup>。

## 4 探索 SVG 经济运行分析

### 4.1 分析数据

变压器空载无功功率损耗计算式：

$$Q_{cbn} = \left[ \frac{U_d\%I_m^2}{100I_c^2} + \frac{I_0\%}{100} \right] S_c \times 16$$

式中， $Q_{cbn}$  为变压器容性无功损耗，kvar；S% 为变压器阻抗电压百分数； $I_m$  为变压器运行最大负荷电流，空载时为 0； $I_c$  为变压器运行额定电流；L% 为变压器空载电流百分数；S 为变压器的额定容量，kVA。

线路损耗功率计算式<sup>[2]</sup>：

$$Q_l = 3I_c^2 \times X \times 10^{-3}$$

$$X = x \times L$$

式中  $Q_l$  为线路无功损耗，kvar；L 为相电流，A；X 为每相电抗， $\Omega$ ；x 为线路单位长度电抗，Q/km；L 为线路长度，km。

线路充电功率计算式为：

$$Q_c = -BU^2 \times 10^{-3} = -bLU^2 \times 10^{-3}$$

式中， $Q_c$  为线路充电功率，kvar；U 为线路额定线电压，kV；B 为导线电纳，s；b 为导线单位长度电纳，S/km；L 为线路计算长度，km。

### 4.2 光伏发电系统无功分布

根据线路及变压器的参数，因夜晚空载运行，于 R 与 X 均较很小，故线路电抗产生的无功损耗可以忽略，光伏场站线路充电功率损耗和无功功率损耗计算见表 1，其中正号表示无功功率的损耗，负号表示线路充电功率损耗。

表 1 光伏电站夜晚无功功率损耗及充电功率

序号	类别	无功损耗 kvar	充电功率 kvar	比例 (%)
1	升压变压器	+97.6		58.8
2	SVG 降压变	+9.6		
	总无功功率损耗	+107.2		100
3	光伏场区集电线路 (电缆)		-236.2	75.5
4	光伏场区集电线路 (架空)线)		-8.8	2.9
	总充电功率		-245	100

光伏电站线路参数：ZRC-YJV22-26/35-3×50 电缆电抗为 0.123n/km，电纳为 39.5S/km，全长 4.5km；JL/GIA-240/30 架空线电抗为 0.37Q/km，电纳为 3.3S/km，全长 2km；JL/GIA-240/30 电缆电抗为 0.37Q/km，电纳为 3.3S/km，全长 1.2km。

### 4.3 无功补偿量

根据分析计算，夜晚系统发出容性无功，35kV 母线感性无功功率约为 +136.8kvar，基本符合实际光伏电站夜晚无功功率曲线，夜间空载时的无功损耗可视为固定值，如图 3 所示，脱网后无功平稳值 136.2kvar。

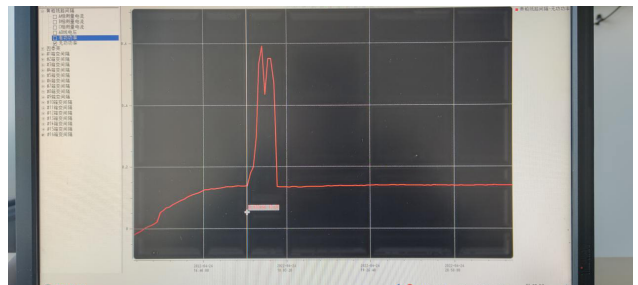


图 3 下网后无功曲线图

按照《光伏电站接入电力系统技术规定》的有关规定，现行光伏电站并网接入必须配备满足要求的无功补偿装置（SVG），使其电能输送的功率因数满足 $\geq 90\%$ 。目前光伏场站夜间有功功率主要包括高压架空线路损耗、主变损耗、箱变损耗、二次设备损耗及逆变器损耗等，有功消耗较少，易于导致功率因数极低。所以我们有必要在可研初期构建高压外送线路模型分析，平衡容性无功损耗与感性无功损耗，其线路参数模型如图4所示<sup>[3]</sup>。

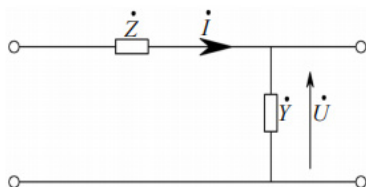


图4 高压外送新路模型

由于光伏电站电费结算计量点设在光伏电站出线对侧变电站并网点，外送架空线路损耗为：5.28kvar，SVG夜间宜采用恒功率补偿，补偿量约为-142kvar。通过分析，当新建光伏电站可通过计算方法调整集电线路和变压器数量、参数等，使夜晚无功达到配置平衡，无需无功补偿。

白天发电时，根据计算公式可知，无功损耗与电流成正比，是一个动态变化量，如图5所示，发出感性无功，消耗容性无功，根据曲线关系，与电流成指数关系，发出感性无功峰值948kvar，宜采用恒电压补偿方式。

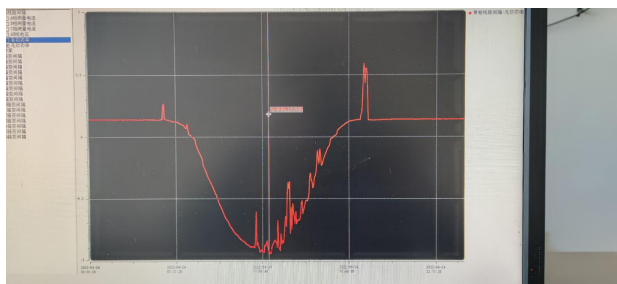


图5 白天并网曲线图

目前供电公司无功考核针对用电用户，即计入+P和Q，其中+P为横轴上半部分，即输入有功，Q为I象限、IV象限组合无功，即关口表组合无功I，其无功功率 $Q=|Q_I|+|Q_{IV}|$ ，容性无功和感性无功均计量，不管是向系统发无功还是吸入系统无功均计量。由于无论是吸收电网无功还是送入电网无功，其最终线路功率因数均较小，线损较大，此种计量方法的目的是希望用户增大功率因数，降低线损，提高供电电能质量，最终达到最优经济性，其功率因数计算方法为：

$$\cos \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

分时段开启SVG。针对德兴黄柏光伏电站具体情况，存在距离较长的地理电缆+架空线路，其中逆变器与架空线路的无功输出存在冲抵临界点。经观察分析数据得出，当有功功率负载达到4.7MW时，在未开启无功补偿装置下，发电系统自身容性无功输出与感性无功输出相互冲抵，达到一个平衡的状态。

根据临界状态，当有功功率负载低于4.7MW时开启，根据某一月数据统计：有功消耗：12390kwh，无功消耗17850kvar·h（感性无功）， $\cos \phi = 0.57$ ，所以，要满足功率因数为0.90的要求，需24小时补偿无功功率。

### 5 SVG补偿无功经济性分析

当SVG设备单元24小时开启，SVG有功损耗约为12kW，由此可知SVG补偿后会增加约26kW的有功损耗，按一个月运行720小时计算，一个月能耗约18720度，平均电价0.59元/度，约增加电费11045元。

当SVG设备单元不开启，每月力调电费为8000~10000元，通过对比，当两个细则不发生考核时，SVG不开启更具有经济性。

### 6 结语

根据光伏场站无功分布计算方法，以黄柏光伏电站为实例，对光伏场站分布的容性和感性无功容量进行计算，在光伏场站建设前期就可达到无功分布平衡，对光伏场站电气设备配置、无功补偿容量配备具有指导意义，对于25年的运行标准，其间节约的运行成本将是提质增效的重要组成部分。

### 7 未来探索

只要有人控制的地方必然有漏洞与缺失，人不能时刻关注设备的实时启动。推广智能技术应用，利用温度传感器、变频风机实现设备温度精确监控，建立SVG风机智能变频与启停，避免不必要的风机启动，减少电能消耗。在保护设备安全运行的基础上，做到节约能源，提高电能质量，实现经济运行。

### 参考文献

[1] 李定华.现有光伏电站夜间用电时功率因数不达标问题的分析[J].电力系统装备,2019(12):2.  
 [2] 景迁.光伏电站无功补偿分析[J].电工技术,2016(11):2.  
 [3] 张彦昌,石巍,祝玉章.大型光伏电站集电线路研究[J].电工电气,2012(8):4.