

分布式光伏对用户侧功率因数影响分析及应对

Analysis on the Influence of Distributed Photovoltaic on Power Factor at User Side and Countermeasures

李为民¹ 张志薇²

Weimin Li¹ Zhiwei Zhang²

1. 广州穗开电业有限公司 中国·广东广州 510000

2. 九州能源有限公司 中国·广东广州 510000

1. Guangzhou Suikai Electric Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, China

2. Jiuzhou Energy Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, China

摘要:近年来,中国在大力支持分布式光伏产业,地方政府也加大补贴力度,分布式光伏得以迅猛发展。分布式光伏发电一般是利用企业既有建筑的屋顶资源,运行方式以企业侧自发自用为主、多余电量上网。该模式提高了企业的供电可靠性和收益,但分布式光伏并网后对企业的功率因数带来影响。鉴于此,论文主要分析分布式光伏并网后对企业功率因数的影响及治理。

Abstract: In recent years, China is strongly supporting the distributed photovoltaic industry, local governments have also increased subsidies, distributed photovoltaic to rapid development. Distributed photovoltaic power generation is generally the use of enterprise existing building roof resources, operation mode to the enterprise side of spontaneous self-use, excess electricity online. This mode improves the power supply reliability and profit of enterprises, but the power factor of enterprises will be affected after distributed photovoltaic grid connection. In view of this, this paper mainly analyzes the influence of distributed photovoltaic grid on the power factor of enterprises and governance.

关键词: 分布式光伏; 电网; 功率因数; 降低; 解决方案

Keywords: distributed photovoltaic; grid; power factor; reduce; solution scheme

DOI: 10.12346/peti.v4i1.6492

1 引言

随着 2030 年碳达峰、2060 年碳中和的目标提出,光伏产业受到越来越多的关注。据相关数据显示,2019 年年底,中国光伏装机累计达 204.3GW,连续五年居全球首位。全国光伏发电量全年达到 2242.6 亿千瓦时,同比增长了 26.3%。2019 年光伏主要产业链产量在全球总产量中的占比继续扩大,产品出口总额约 207.8 亿元,同比增长 29%。进入 2020 年,各个行业都由于新冠肺炎疫情受到了不同程度的影响,但光伏产业却实现了难能可贵的逆势上扬。

在中国的光伏装机中,分布式光伏占据着接近一半的份额。分布式光伏发电特指在用户场地附近建设,运行方式以用户侧自发自用、多余电量上网,且在配电系统平衡调节为特征的光伏发电设施。分布式光伏发电遵循因地制宜、清洁

高效、分散布局、就近利用的原则,充分利用当地太阳能资源,替代和减少化石能源消费。分布式光伏系统由光伏组件、逆变器组成。逆变器跟踪光伏电池最大功率点、控制并网电流的波形和功率,将光伏电池所发出的电能逆变成正弦电流并入电网中,使向电网传送的功率与光伏阵列所发的最大功率电能相平衡。光伏并网系统的传输能量来源于光伏电池,由电池的特性决定其输出的电压和电流曲线为非线性,受光照和温度的影响,输出功率跟随变化。光伏系统通过电力电子变换器将直流电变换为交流电并入电网^[1]。

2 分布式光伏接入后对电网功率因数的影响

分布式光伏发电系统在为用户提供清洁能源的同时,其并网运行后也会干扰用户供电网络无功补偿装置的运行,而

【作者简介】李为民(1968-),男,中国广东梅州人,本科,工程师,从事以光伏、储能、蓄冷等为核心的新能源电力工程技术方面的研究。

且光伏电站的发电功率越接近于用户用电负荷，对无功补偿装置的影响越大，甚至会引起无功补偿装置的停运，最终造成功率因数不合格。通过对分布式光伏在不同发电功率时用户对供电网络的影响进行分析，提出解决方案。

2.1 功率因数的定义

功率因数是电力系统的一个重要的技术数据。功率因数是衡量电气设备效率高低的一个系数。功率因数低，说明电路用于交变磁场转换的无功功率大，增加了线路供电损失，因此供电部门对用电单位的功率因数有一定的标准要求。在交流电路中，电压与电流之间的相位差（Φ）的余弦叫做功率因数，用符号 cosΦ 表示，在数值上，功率因数是实际功率和视在功率的比值，即 cosΦ=P/S。所以，提高功率因数的一个重要手段就是加装无功补偿装置，以降低无功功率。

2.2 当前电网对功率因数考核的计算依据

为提高电能使用效率，中华人民共和国水利电力部、国家物价局于 1983 年 12 月 2 日出台了《功率因数调整电费办法》（水电财字第 215 号文件），办法规定容量在 100kVA 及以上的电力用户均须进行功率因数考核，未达到考核标准将加收功率因数调节费（即力调电费），超过考核标准的按超过比例进行奖励。用户功率因数考核标准为 0.85 或 0.90，若功率因数远低于标准，不仅会造成电网运行负担，同时力调罚款数量也巨大。由于用户负荷与负荷性质在每天的不同时段不一定一致，用户一般会加装带有自动投切功能的无功补偿（多为电容性设备）装置，自动调整补偿力度^[2]。

关于无功电能四象限测量的定义在 DL/T645—2007《多功能电能表通信协议》中做出了规定，电能表的正、反向与电能的受（送）相关，一般情况用户接受系统的电能定义为正向；用户内部发电向系统送电定义为反向。

①当系统向用户输送有功和无功时，电能表工作在第 I 象限，电能表显示有功是正值，无功也是正值；这是用户的正常用电模式，即有功电能和无功电能全部来自电网；

②当系统向用户输送无功，用户向系统反送有功时，电能表工作在第 II 象限，电能表显示有功是负值（反向有功），无功是正值；这时用户负荷无法全部消纳分布式光伏发电，余电上网的情况，有功电能倒送回电网，而负载所需无功仍然来自电网；

③当用户向系统反送有功和无功时，电能表工作在第 III 象限，电能表显示有功是负值，无功也是负值；有些自发电的用户在内部没有负荷时，出现和专业电厂一样，有功和无功全部向网上输送；

④当系统向用户输送有功，用户向系统反送无功时，电能表工作在第 IV 象限，电能表显示有功是正值，无功是负值；这时用户从系统取有功，但用户的电容补偿处于过补偿状态，向系统反送无功。

《功率因数调整电费办法》中规定用户功率因数的计算公式为：

$$\cos\phi = P / \sqrt{(|Q_L| + |Q_C|)^2 + P^2}$$

式中，容性无功 Qc 和感性无功 QL 的方向相反，关口表在计算功率因数时采用正反向无功的绝对值相加。而有功只取正向有功电能，反向有功电能是不参与功率因数计算的。即当用户分布式光伏向电网倒送有功时（电能表工作在第 II 或第 III 象限），关口表的功率因数会降低。

3 分布式光伏接入前、后对用户功率因数的影响

3.1 用户接入分布式光伏前的功率因数情况

某公司厂房市电供电变压器容量为 1250kVA，用户 0.4kV 母线通过检测变压器低压总开关下端采样 CT 的电流来控制无功补偿装置投切补偿电容器，从而保证功率因数控制在 0.9 以上。

用户所需的有功功率 P 负载 =P 电网；

用户侧所需的无功功率 Q 负载 =Q 电网 +q 补；

功率因数：

$$\cos\phi = \cos\left(\arctan \frac{Q_{\text{电网}}}{P_{\text{电网}}}\right) = \cos\left(\arctan \frac{Q_{\text{负载}} - q_{\text{补}}}{P_{\text{负载}}}\right)$$

可以看到，无功补偿越接近负载无功，即用户整体负载属性趋近于纯电阻，功率因数越接近 1。

3.2 用户接入分布式光伏后的功率因数情况

用户电网接入分布式光伏的一般方式如图 1 所示，即光伏接入点 A 为用户 0.4kV 母排上。此时负载的有功由电网和光伏共同提供，且由于光伏逆变器的设置，光伏供电优先于电网供电。负载的无功则由电网、补偿电容器和光伏提供，国家标准 GB29321—2012《光伏发电站无功补偿技术规范》中提出“光伏逆变器功率因数应能在超前 0.95~滞后 0.95 范围内连续可调”，因此光伏发电本身的功率因数都较高，其吸收和发出的无功功率由于光伏逆变器的功率因数基本设置在 0.98 以上，所以基本可以认为逆变器输出的是纯有功，负载无功基本是由电网和补偿电容器提供^[3]。

用户所需的有功功率 P 负载 =P 电网 +P 光；

用户所需的无功功率 Q 负载 =Q 电网 +q 补 +q 光；

功率因数：

$$\cos\phi = \cos\left(\arctan \frac{Q_{\text{电网}}}{P_{\text{电网}}}\right) = \cos\left(\arctan \frac{Q_{\text{负载}} - q_{\text{补}} - q_{\text{光}}}{P_{\text{负载}} - P_{\text{光}}}\right)$$

由于光伏的发电量受太阳辐射大小的变化而变化，从而影响到整个供电网络的变化，主要现象如下：

0.4kV 母线补偿电容的投切更为频繁；并且在同样负载情况下，电容投切数量大于光伏并网前；光伏发电量大于负载用电量时，电容补偿全部退出运行；此时无功补偿控制器显示为负值；关口表的功率因数随光伏发电量的增加而降低。

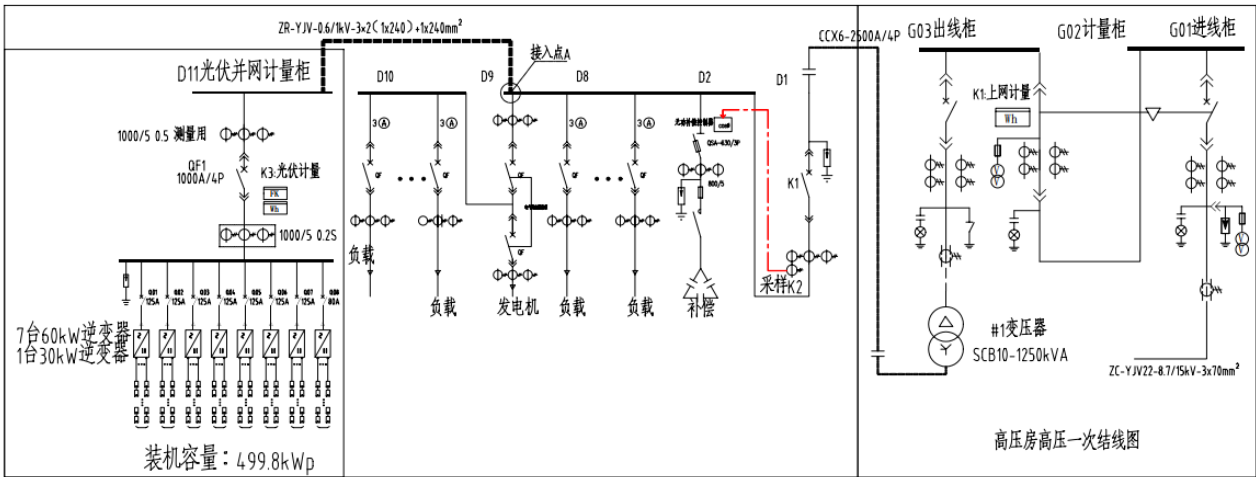


图 1 某公司分布式光伏并网接入情况（改造前）

3.3 光伏接入电网导致功率因数变化原因及情况分析

针对光伏发电并网后所产生的一系列问题，有必要对配电网系统各类电参数的变化进行深入分析。下文的分析基于用户负载一定时（负载有功、无功基本维持不变）的条件，对不同光伏发电功率情况下进行分析。

3.3.1 光伏发电功率小于用户负载功率时， $P_{光} < P_{负}$

当光伏发电功率小于负载功率时，此时 P 电网 = P 负载 - P 光 > 0；Q 电网 = Q 负载 - q 补。0.4kV 母线无功补偿控制器所检测到的有功电量减少，而负载无功不变情况下，功率因数与光伏发电量成反比例关系。关口表的功率因数与无功补偿控制器情况一致，关口表工作在第 I 象限。

当负载维持一定时，由于 K2 计量点有功功率 P 电网随着光伏发电功率 P 光的增加而减小，而无功功率 Q 电网由于光伏逆变器基本没有无功 q 光输出基本不变。造成功率因数下降。无功补偿控制器发出指令增加电容补偿容量，减少无功功率 Q 电网的输入。

所以，当 $P_{光} < P_{负}$ 时，我们会发现用户 0.4kV 母线无功补偿装置会随着光伏发电功率的增加而投入更多的补偿电容。这是由于光伏输出有功电能 P 光的增加造成 P 电网的减少，而来自电网的无功电能基本不变，此时功率因数随着 P 光的增分布式光伏并网后对功率因数的影响和解决方案加而下降，无功补偿装置会投运更多的补偿电容以维持功率因数在设定值。造成功率因数下降的实质是由于 K2 检测点有功功率的减小，而不是无功的变化。

3.3.2 光伏发电功率等于用户负载功率时， $P_{光} = P_{负}$

当光伏发电功率接近负载功率时，此时 P 电网 = P 负载 - P 光 ≈ 0；Q 电网 = Q 负载 - q 补。0.4kV 母线无功补偿控制器 K2 所检测到的有功电量处于时而正向，时而反向。当 K2 检测到反向有功时，无功补偿电容器全部退出；当 K2 检测到正向有功时，补偿电容会因为功率因数很低而全部投运。造成系统的不稳定现象。关口表在第 I 象限和第 II 象限之间转换。

3.3.3 光伏发电功率大于用户负载功率时， $P_{光} > P_{负}$

当光伏发电功率大于负载功率时，此时 P 电网 = P 负载 - P 光 < 0；Q 电网 = Q 负载 - q 补。0.4kV 母线无功补偿控制器 K2 所检测到的有功电量为负值，无功补偿电容器全部退出（由于无功补偿控制器所检测电流是单方向的），q 补 = 0。此时负载无功功率全部来自电网 Q 电网 = Q 负载。关口表的正向有功 P 电网 = 0（此时反向有功 > 0），无功功率由于补偿电容的退出，无功全部来自电网，因此 Q 电网将大幅增加，功率下降。关口表工作在第 II 象限。此时的功率因数已不能真实反映用户的实际无功情况。

4 解决方案

为使用户侧的功率因数维持在合理的水平，避免力调考核电费的增加，我们提出更换无功补偿装置并加装 SVG 装置、更改光伏并网点接线方式、更改无功补偿控制器监测回路接线方式四种解决方案。

4.1 方案 1：更换无功补偿控制器及加装 SVG 装置

更换无功补偿控制器支持四象限无功检测，能够正确识别系统的四种运行方式，准确地控制电容器组投切。同时加装有源无功发生器 SVG 装置，由于无功发生器 SVG 可连续输出，配合投切电容器后就能消除原有的输出台阶误差（连续补偿），达到整机容量快速连续输出的目的。可以实现装置具有连续无级可调、快速响应、无涌流等特点。

这种方案是目前用户分布式光伏项目普遍采用的一种解决方案，在光伏发电量小于用户负载用电量时，能够部分解决光伏低压并网后功率因数不稳定的问题。由于系统没有解决无功补偿器的采样问题，所以无法正确反映功率因数。

4.2 方案 2：改变光伏主接线并网点方式

目前 0.4kV 低压并网一般都是并接在母排上接入点 A，这样造成低压无功补偿控制器的检测点 K2 无法检测到光伏的发电量，所以无功补偿控制器不能正确反映该配电网的功率因数，也就不能正确控制补偿电容的投切。为了能够正

确反映功率因数,可以将并网点改到接入点B。这时K2检测点流过的电流是市电与光伏的合并电流, $P_{负}=P_{市}+P_{光}$,无功补偿控制器能够正确反映系统的功率因数。

方案2适用于低压总开关柜有空间,光伏并网主电缆可以直接并接在电流互感器与总开关之间。这种改变并网点的接线方式,配合更换无功补偿控制器为双向无功补偿控制器,能够直接解决无功补偿器采样不完整造成的功率因数降低的问题。当用户节假日休息或停产时,光伏发电量远大于负载用电量,长时间处于光伏发电倒送回电网时,需要密切关口表的力率。

4.3 方案3:改变无功补偿控制器的监测回路接线方式

系统原无功补偿控制器的电量只采样市电的电量信息,在光伏发电系统并网后,如果控制器不对光伏电量进行采样,就会造成控制器的误判。因此在无功补偿控制器中加入光伏的发电量信息进行修正,即在光伏并网处设置监测点K3,增设一套与无功补偿装置原监测点K2同型号、同参数的电流互感器(与K2同相)。两套电流互感器二次绕组同向并接后接入无功补偿控制器回路,使无功补偿装置能根据用电负荷实际需要的总无功功率调整投入的电容器组数量,保证母线功率因数满足标准的要求。

本方案与方案2有着同样的效果和缺陷,方案2是通过改变一次接线的方式,而本方案是通过改变二次接线的方式。当然在受主接线空间受限的情况下,该方案更为简便。

4.4 方案4:调整光伏逆变器输出功率因数

一般情况下逆变器无功控制方式设置为恒功率运行,通常情况下功率因数恒定设为0.99,逆变器不向电网提供无功容量。但如果逆变器的容量大于光伏组件的容量,则可以将

逆变器无功输出,调节范围为超前0.8~0.9,向电网输出一定量的容性无功。

此种方案调节能力有限,只适用于光伏并网后功率因数略有下降,且光伏逆变器的容量大于光伏组件容量的情况下。通过调整逆变器的功率因数,向电网输出一定量的无功,从而提高电网功率因数。投入费用少,操作简单。

5 研究结论

在应用第三章所述的四种解决方案后,能够满足光伏发电系统功率随光照和温度变化特点的情况下正确补偿无功功率的需求,解决了系统处于任何四象限状态时功率因数低的电能质量问题,满足光伏电站接入电力系统后功率因数的技术要求。

但是无论何种解决方案,都不能解决关口表的力率计费问题。当用户节假日休息或停产时,长时间处于光伏发电倒送回电网时,需要密切关注关口表的力率,避免因单纯从电网吸收无功功率导致的功率因数下降。

随着分布式光伏行业的持续发展,政府和电网针对分布式光伏电站的功率因数考核标准,应同步更新,使得考核更合理,更有利于行业健康发展。

参考文献

- [1] 赵伟然,汪海蛟,李光辉,等.分布式光伏并网电压和功率因数协调控制策略[J].电力工程技术,2017(11):5.
- [2] 陈伟.分布式光伏发电接入对用电客户功率因数的影响及计算方法探讨[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2015(5):3.
- [3] 杨长存.提高光伏发电功率因数新方法[J].科学技术创新,2018(27):5.