

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.04.007

分布式光伏并网导致功率因数变低的案例分析及 解决方案

邵红星

(青岛东软载波科技股份有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 分布式光伏电站并网后,造成关口功率因数降低,通过实际案例调研,发现功率因数降低的原因并非完全一致,跟并网点位置、光伏安装容量、实际负荷、无功补偿型式、无功补偿容量分配、无功补偿采样点位置、谐波保护配置等有关,通过分析、计算,针对不同原因,提出针对性的有效解决方案。
关键词: 功率因数; 分布式光伏电站; 无功补偿; 谐波; 解决方案

Case Analysis and Solution of Low Power Factor Caused by Distributed Photovoltaic Grid Connection

SHAO Hongxing

(Qingdao Eastsoft Communication Technology Co., Ltd., Shandong Qingdao 266000, China)

Abstract: The distributed photovoltaic power station, after connection to the power grid, causes reduction of the power factor of the gateway. It is found through the actual case investigation that the reasons for the reduction of the power factor are not exactly the same. It is related to the location of the grid-connected point, photovoltaic installation capacity, actual load, type of reactive power compensation, reactive power compensation capacity distribution, sampling point location of reactive power compensation, harmonic protection configuration, etc. Through analysis and calculation, the specific effective solutions are proposed for different reasons.

Keywords: power factor; distributed photovoltaic power station; reactive power compensation; harmonic; solutions

0 引言

在国家节能双碳政策背景下,光伏发电具有显著的能源、环保和经济效益^[1-4],是最优质的绿色能源之一,分布式光伏发电因清洁高效、分散布局、就近利用的特点,发展前景广阔,越来越多的企业屋顶开发分布式光伏电站^[5-8]。

分布式光伏发电系统由光伏组件、逆变器、并网柜等部分组成。分布式光伏发电一般是在已有屋顶或新建屋顶建设,一般发电量消纳方式为“自发自用,余电上网”^[9]。

光伏并网发电系统在一般情况下只发送有功电能,功率因数接近1,能标^[10]规定“当逆变器输出有功功率大于其额定功率的50%时,功率因数应不小于0.98(超前或滞后);输出有功功率在20%~50%之间时,功率因数应不小于0.95(超前或滞后)”。理论上,光伏发电不会对企业的功率因数造成不良

影响,但笔者参与设计、施工的多个分布式光伏电站,在并网后影响无功补偿装置的运行,无功补偿装置不能根据设置正确投切,有些甚至造成无功补偿装置的停运及接触器、电容器的烧毁,导致关口功率因数降低。根据水利电力部、国家物价局文件出台的《功率因数调整电费办法》(水电财字215号文件),功率因数达不到供电公司考核要求,一些企业面临供电公司的罚款。本文根据现场实例,分析造成此种现象的原因,提出可行性解决方案。

1 案例介绍

1.1 变配电室情况

该用户为汽车零部件生产公司,以其中一个计量点为例,设有1台35 kV/10 kV 5 000 kVA电力变压器,4台10 kV/0.4 kV 1 600 kVA配电变压器,每台配电变压器下配置12组36 kvar电容补偿装置。设4处并网点,1号并网点光伏装机420.75 kwp,2号

收稿日期:2023-02-24

并网点光伏装机 330 kwp, 3 号并网点光伏装机 440 kwp, 4 号并网点光伏装机 412.5 kwp。关口计量点(功率因数标准考核点)设置在企业 35 kV 变电站计量柜, 用户功率因数考核标准为 0.9。

光伏并网点设计在每个低压变压器低压侧母线处,光伏组件安装于企业车间屋顶,采用 380 V 电压等级接入,发电量消纳方式为“自发自用,余电上网”。分布式光伏接入企业内部配电网主接线图见图 1。

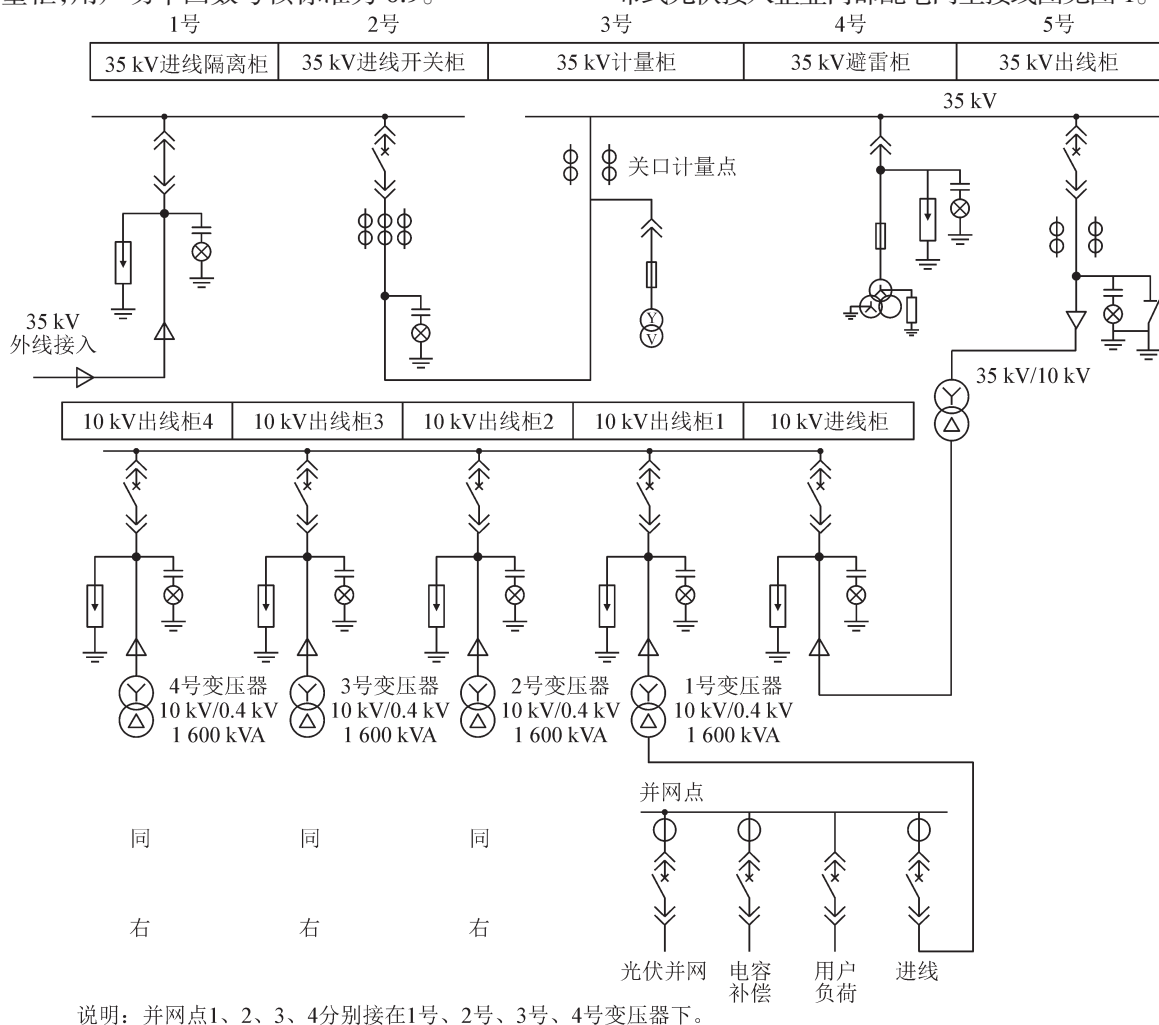


图1 分布式光伏接入企业内部配电网主接线图

Fig. 1 Main wiring diagram of distributed photovoltaic (PV) connecting to the internal power distribution network of an enterprise

1.2 故障描述

1)并网点 1:①企业检修时,在光伏电站发电高峰,功率因数为负数,当月功率因数很低。光伏发电高峰时,并网点有功为-183.72 kW、无功功率为279.30 kvar、功率因数为 0.55。②并网点无功需求不高,但功率因数很低。有功功率为 17.76 kW,无率功率为 17.76 kvar,功率因数为 0.70。

2)并网点 2:现场无功补偿电容器全部投入,功率因数依旧很低,有功功率为 68.18 kW,无功功率为 109.09 kvar,功率因数为 0.53。

3)并网点 3:并网点无功需求很高,无功补偿却不能投入,功率因数很低,有功功率为 123.8 kW,无功功率为 342.86 kvar,功率因数为 0.34。

4)综合以上各并网点的故障,造成关口计量点功率因数很低。光伏月发电量和车间用电量的分时统计表见图2,车间月视在电量、有功电量、无功电量、功率因数统计见表1。

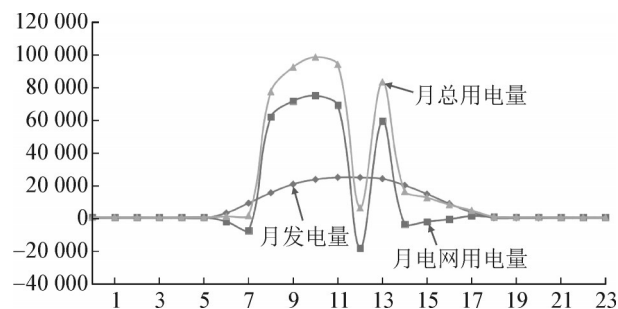


图2 光伏月发电量和车间用电量的分时统计表
Fig. 2 Time-sharing statistical table of monthly photovoltaic energy generation and workshop electricity consumption

表1 车间月视在电量、有功电量、无功电量、功率因数统计
Table 1 Monthly apparent electricity quantity, active power quantity, reactive power quantity and power factor statistics of the workshop

序号	车间工区	变压器容量/kVA	月视在电量/kVAh	月有功电量/kWh	月无功电量/kvarh	月平均功率因数
1	铸造	1 600.00	95 232.00	79 994.88	51 671.59	0.84
2	齿轮	1 600.00	71 424.00	55 710.72	44 695.68	0.78
3	装配	1 600.00	83 328.00	67 495.68	48 866.03	0.81
4	驱动	1 600.00	142 848.00	127 134.72	65 133.05	0.89
5	总计	6 400.00	392 832.00	330 336.00	210 366.34	0.84

2 案例分析

2.1 月平均功率因数计算

《功率因数调整电费办法》中规定“凡装有无功补偿设备且有可能向电网倒送无功电量的用户,应随其负荷和电压变动及时投入或切除部分无功补偿设备,电业部门应在计费计量点加装带有防倒装置的反向无功电度表,按倒送的无功电量与使用的无功电量两者的绝对值之和,计算月平均功率因数”。平均功率因数的计算公式为

cos φ = P / (√(P² + (|Q_用| + |Q_送|)²)) (1)

式中:P 为计量关口正向有功电量,kWh; Q_用 为计量关口使用无功电量,kvarh; Q_送 为计量关口倒送无功电量,kvarh。

根据国标^[11]关于无功电能四象限测量的定义(见图 3), I 象限:电网向用户输入有功、无功功率; II 象限:电网向用户输入无功功率,用户向电网输入有功功率; III 象限:用户向电网输入有功、无功功率; IV 象限:电网向用户输入有功功率,用户向电网输入无功功率。

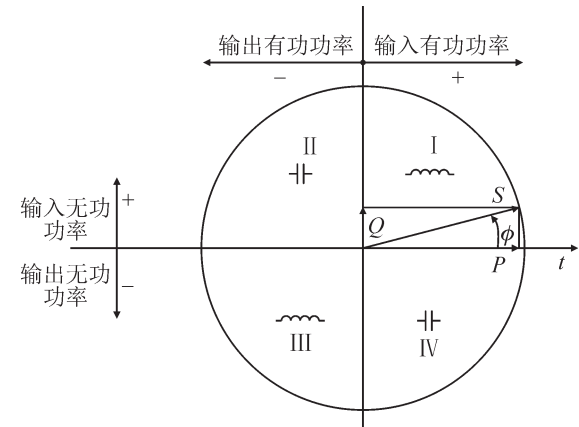


图3 有功功率和无功功率的几何示意图
Fig. 3 Geometric diagram of active power and reactive power

2.2 原因分析

1)并网点 1

①企业检修时,在光伏电站发电高峰,工区有发电倒送电网情况,并网点实时功率因数呈现为负数。根据图 3,工作在第二、三象限,现场二象限无功补偿控制器只具有单方向控制功能,此时控制器判定为无功补偿装置过补偿^[12],补偿电容全部切除,根据公式(1),正向有功减少,无功增加,累计下来,造成功率因数很低。

②光伏发电量基本等于负荷消耗电量,厂区用电大部分电能取自光伏电站,只需从电网吸收少量有功电能(17.76 kW),光伏发电功率因数接近 1,所有的无功均从电网获取(17.76 kvar),单组电容器容量为 36 kvar,达不到投运要求^[13],造成功率因数降低。

2)并网点 2

光伏并网后,光伏发电功率因数接近 1,主要输出有功功率。假设负载一定的情况下,来自电网的有功功率减少,无功不变,此时如果还要维持功率因数不变,需要增加无功容量,见图 4。光伏并网前,电网输出功率为 P₁、Q₁,光伏并网后光伏输出功率为 P₂,电网输出功率为 P₃、Q₃。如果想维持原来的功率因数,电网输出无功需减少 Q₂,则需无功补偿多提供 Q₂ 的无功,如果无功补偿预留裕量不足,则会出现即使无功补偿全部投入的情况下,功率因数依然不达标。

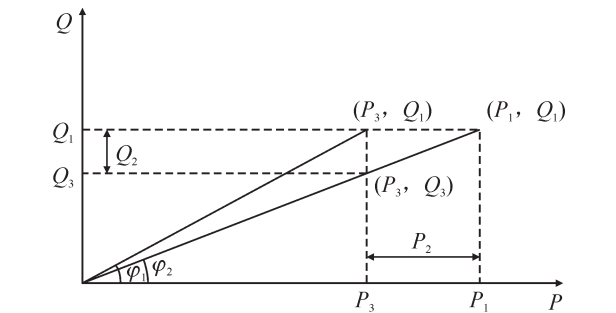


图4 光伏并网后,无功需求示意图
Fig. 4 Reactive power demand diagram after connection of photovoltaic

表2 光伏并网前后,无功需求表
Table 2 Reactive power demand table before and after PV grid-connection

参数	数值/kW	参数	数值/kvar
P_1	360.54	Q_1	109.09
P_2	292.36	Q_2	85.37
P_3	68.18	Q_3	23.72

3) 并网点 3

笔者通过现场踏勘发现,对于平时运行谐波未超标的车间,在光伏投入后谐波超限保护装置也会动作,造成电容器组不能准确投入。分析原因如下:谐波超限保护动作值取电流总谐波畸变率(见图5)^[14]。本电站无功补偿控制器谐波电压采样点为母线处,谐波电流采样点为低压电源进线柜(图9 K₁点)^[15]。总用电负荷电流由电网输出电流和光伏发电电流组成。光伏电站输出的电能质量较好,可近似看成仅输出基波电流,在光伏发电高峰期,光伏电站提供了大部分基波电流,电网输出的基波电流占一小部分,而系统中的谐波电流没有变化,基波电流减小,而谐波电流不变,在无功补偿谐波电流采样点检测到的电流总谐波畸变率变大(见图6),无功补偿装置谐波超值保护启动,电容器切除,造成系统功率因数很低。在光伏并网前或光伏发电低谷的时候,基波及谐波几乎全部来自电网,采样点总谐波畸变率正常(见图7),无功补偿可以正确投入。

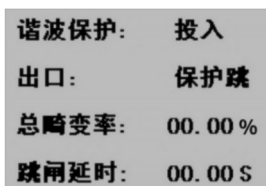


图5 谐波超限保护装置界面
Fig. 5 Interface of harmonic over-limit protection

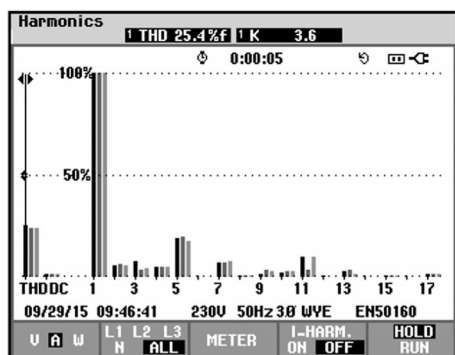


图6 光伏并网后电流总谐波畸变率大幅升高(25.4%)
Fig. 6 Significant increase of the total harmonic distortion rate of photovoltaic current after PV grid connection (25.4%)

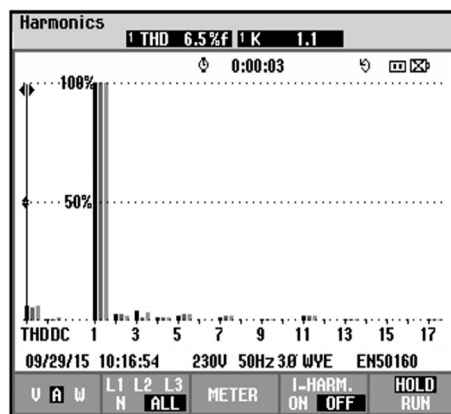


图7 光伏并网前电流总谐波畸变率正常(6.5%)
Fig. 7 Normal total harmonic distortion rate before PV grid-connection (6.5%)

3 案例解决方案

3.1 更换四象限无功补偿控制器,加装静止无功补偿器

光伏并网后,原来仅能检测二象限无功补偿控制器已不能满足控制要求,电容器不能准确投切。更换支持四象限无功检测的无功补偿控制器后,能够正确识别系统的四种运行方式,保证在任何工况,都能准确地控制电容器组投切。

原有普通电容器跨度级差太大,导致电容器不能准确投切^[16]。在原来电容器的基础上增加一套与原来电容器单组投切相同容低压静止无功补偿器(static var generation, SVG)(此情况仅仅发生在光伏发电与负荷用电相近的情况,电网侧输送电量很小,数据上虽然显示功率因数很低,实际随着时间积分的累积,一般不会造成罚款,如此工况仅仅是偶尔出现,考虑经济成本,也可不进行此项改造),原有电容补偿装置实现大容量的粗调,利用 SVG 光滑连续输出无功,实现小容量的细调^[16-19]。保证在光伏发电接近用电负荷时,功率因数正常,减少电容器组频繁投切造成的电容器、接触器损坏。

此方案适用解决并网点 1 出现的问题,可以从根本上解决大多数功率因数低的问题,是目前企业分布式光伏项目最理想的一种解决方案。对于确定不存在倒送电工况的项目,则无需更换无功补偿控制器。

3.2 更换四象限无功补偿控制器,利用光伏逆变器的动态调节

根据国标^[20]要求,光伏发电站要充分利用并网逆变器的无功容量及其调节能力。光伏逆变器功率因数一般默认调整为 0.99 左右。光伏并网后,如

果功率因数降低不多,可通过调整光伏逆变器输出功率因数,让逆变器暂时输出一定的无功功率,解决光伏并网后功率因数降低的问题,见图8。

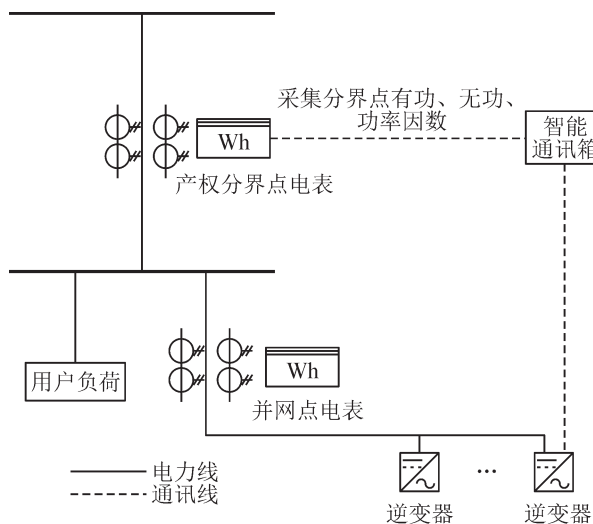


图8 利用逆变器本身调节,补偿系统所需无功示意图
Fig. 8 Reactive power schematic diagram for the compensation system with the adjustment of the inverter itself

此方案适用于解决并网点1出现的问题,投资费用少,但无功控制需要多台设备通讯,逆变器超过一定数量后通讯响应较慢^[21]。本方案仅适用于功率因数下降不多、逆变器数量较少且距离较近的情况。对于确定不存在倒送电工况的项目,则无需更换无功补偿控制器。

3.3 增加无功补偿容量

如果所有电容器均投入,却依然不能满足无功补偿需求时,说明因为光伏发电长期占比较高^[22-31],造成原无功补偿容量不能满足要求,见图4。需根据现场实际情况新增适当容量的电容器组,计算公式为

$$Q_2 = (P_1 - P_3) \times \tan \cos^{-1} \varphi_2 \quad (2)$$

式中: P_1 为光伏并网前电网输出有功功率, kW; P_3 为光伏并网后电网输出有功功率, kW; $\cos \varphi_2$ 为供电公司要求的功率因数标准。

此方案适用于解决并网点2出现的问题,如果经过3.1、3.2节改造后,出现所有电容器均投入,却依然不能满足无功补偿需求时,需根据此方案整改。

3.4 谐波治理

并网前电流总谐波畸变率正常,并网后电流总谐波畸变率超标,造成无功补偿装置全部切除,提供以下几种解决方案:

1) 方案1: 在光伏并网柜并网点 K_2 处增设一套电流互感器, 电流互感器变比按照光伏发电容量选

择^[22], 二次侧额定电流及准确级^[32]应与无功补偿装置原监测点 K_1 的电流互感器保持一致。两套电流互感器二次绕组同向并联后接入谐波超限保护装置采样回路, 使谐波超限保护装置能根据用电负荷实际的电流畸变率保护电容器组的投切。改造后的谐波超限保护装置监测回路示意图见图9。

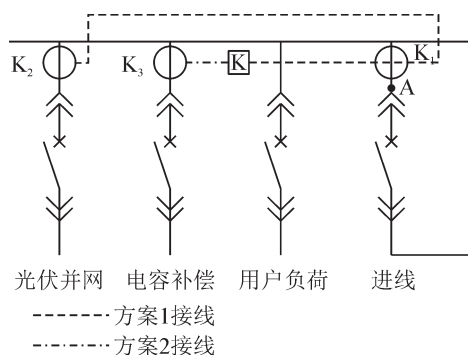


图9 改造后谐波超限保护装置监测回路示意图
Fig. 9 Schematic diagram of monitoring circuit of harmonic over-limit protection device after transformation

2) 方案2: 谐波超限保护电流采样点设置在电容器组回路 K_3 点, 这样能保证谐波采样为通过电容器的实际谐波电流畸变率, 保证谐波超限保护装置能根据电容器组回路实际的电流畸变率保护电容器组的投切, 改造后的谐波超限保护装置监测回路示意图见图9。

3) 治理方案3: 选择谐波保护整定值为谐波电流(方均根值)的保护装置, 根据国标^[33]谐波电流允许值应该以谐波电流含量(方均根值)为判断依据, 而不能以谐波电流畸变率为判断依据。根据现场设备计算出谐波电流实际值, 根据国标^[33]计算出谐波电流允许值, 乘以相应系数计算出谐波保护整定值。

此方案适用于解决并网点3的问题, 如果经过3.1、3.2节改造后, 却因为电流总谐波畸变率超标导致电容器不能准确投切的情况, 需根据本条方案整改。

3.5 解决方案误区及对策

笔者根据现场经验及查阅相关文献^[34-37], 现在许多光伏电站整改方案采取以下两种方案:

1) 修改光伏发电并网点至无功补偿控制器及谐波超限保护装置采样点(下文均简称采样点)上侧。详见图10(并网点修改至A点)。

2) 在光伏发电并网点 K_2 处增设一套电流互感器, 与进线 K_1 处电流互感器二次绕组同向并联后接入无功补偿控制器及谐波超限保护装置采样回路(以下均简称采样回路)。详见图11。

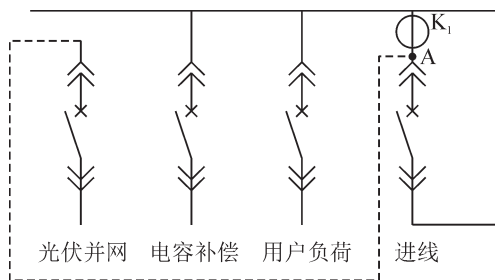
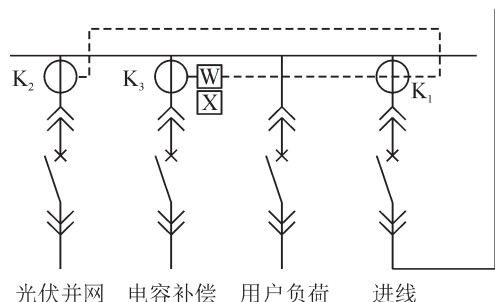


图10 改造并网点一次接线位置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the primary connection position of the reconstructed connection network

图11 改造无功补偿控制器、谐波超限保护取样回路示意图
Fig. 11 Schematic diagram of retrofitting reactive power compensation controller and harmonic overrun protection sampling loop

这两种方案改造后,采样回路检测的电流为电网市电与光伏发电电流之和,不会出现有功倒送及谐波电流畸变率“假”超标原因造成的无功补偿不能正确投入的情况。根据本文 2.2-2 节的分析,由于采样点采集的是电网和光伏发电的电流总和,在功率因数显示正常的情况下,来自电网的功率因数仍然偏低,依然会产生罚款。如发生此种情况,无功补偿控制系统需选择有无功功率控制模式的控制器,并将无功补偿控制模式设置为无功功率控制模式。如果无功补偿预留裕量不足,还需根据现场实际情况新增适当容量的电容器组。

4 结语

分布式光伏电站接入用户配电网后引起功率因数降低的原因主要有:

- 1)有功倒送造成二象限无功补偿控制器不能正确投入;
- 2)无功需求增加造成原无功补偿容量不足;
- 3)谐波电流“假”超标造成谐波超限保护误动作;
- 4)来自电网有功减少,原无功补偿精度不足,造成无功补偿装置不能准确动作。

对应的解决方案如下:

- 1)更换四象限无功补偿控制器;

- 2)增加无功补偿容量;
- 3)更改谐波超限保护采样数据;
- 4)加装静止无功补偿装置(SVG)。

长远来看,从根本上解决此类问题,建议在光伏电站建设的前期勘察设计阶段,根据国标^[25-26]、典设^[27]要求及设计需求,对用户的负荷性质、实际负荷大小、无功补偿容量、光伏接入容量、谐波保护配置、变压器容量等综合分析,选择合适的并网点位置及并网容量分配。

参考文献

- [1] 张珍珍,吕清泉,张健美. “双碳”目标下分布式光伏发电技术的研究进展及展望[J]. 太阳能, 2023(1): 17-21.
ZHANG Zhenzhen, LYU Qingquan, ZHANG Jianmei. Research progress and prospect of distributed PV power generation technology under the goal of emission peak and Carbon neutrality[J]. Solar Energy, 2023(1): 17-21.
- [2] 王琦,徐俊杰,李星硕,等. 基于柔性工作点追踪的光伏低电压穿越控制策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 55-63.
WANG Qi, XU Junjie, LI Xingshuo, et al. Photovoltaic low-voltage ride-through control strategy based on flexible power point tracking[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 55-63.
- [3] 王凯,郑会奇. 浅谈 35 kV 及以下油浸式光伏发电用变压器的温升设计[J]. 变压器, 2023, 60(1): 8-10.
WANG Kai, ZHENG Huiqi. Discussion on temperature rise characteristics of 35 kV and below oil-immersed photovoltaic transformers[J]. Transformer, 2023, 60(1): 8-10.
- [4] 张沈习,王丹阳,程浩忠,等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189-207.
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for Carbon emission peak and Carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207.
- [5] 张敏,刘进,林江刚,等. “双碳”背景下屋顶分布式光伏开发环境效益分析[J]. 能源研究与利用, 2021(6): 37-41.
ZHANG Min, LIU Jin, LIN Jianggang, et al. Environmental benefit analysis of roof distributed photovoltaic development under dual Carbon background[J]. Energy Research & Utilization, 2021(6): 37-41.
- [6] 张长春,赵尚,杨弘诚,等. 光伏并网逆变器内部短路故障耐受性能试验研究[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 28-33.
ZHANG Changchun, ZHAO Shang, YANG Hongcheng, et al. Research on withstand performance test of internal short circuit fault of photovoltaic grid connected inverter[J]. High

- Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 28-33.
- [7] 崔晓东, 戴芳芳, 李猛, 等. 利用分布式光伏发电进行木材加工企业节能减排的规划和实践[J]. 中国人造板, 2018, 25(4): 7-11.
- CUI Xiaodong, DAI Fangfang, LI Meng, et al. Planning and practice for wood processing enterprises utilizing distributed photovoltaic system to achieve sustainable development [J]. China Wood-Based Panels, 2018, 25(4): 7-11.
- [8] 詹天津, 谢玉荣. 国内分布式光伏发展形势分析及思考[J]. 华电技术, 2021, 43(12): 60-65.
- ZHAN Tianjin, XIE Yurong. Development status analysis and consideration on domestic distributed PV energy[J]. Huadian Technology, 2021, 43(12): 60-65.
- [9] 王东, 张增辉, 江祥华. 分布式光伏电站设计、建设与运维[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [10] 光伏发电并网逆变器技术规范: NB/T 32004—2013[S]. 2013.
- Technical specification of grid-connected PV inverter: NB/T 32004—2013[S]. 2013.
- [11] 交流电测量设备 特殊要求 第23部分: 静止式无功电能表(2级和3级): GB/T 17215. 323—2008[S]. 2008.
- Electricity metering equipment (a.c.) - Particular requirements-Part 23: Static meters for reactive energy (classes 2 and 3): GB/T 17215. 323—2008. [S] 2008.
- [12] 杨德印, 杨电功, 崔靖. 电气控制一本通[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.
- [13] 崔驰. 低压配网无功补偿浅析[J]. 电网技术, 2000, 24(7): 71-72.
- CUI Chi. Preliminary analysis of reactive power compensation in low voltage distribution network[J]. Power System Technology, 2000, 24(7): 71-72.
- [14] 陈进. 低压并联电容器运行中的谐波超值保护[J]. 电力电容器, 1993(2): 34-37.
- CHEN Jin. Harmonic over-value protection in operation of low voltage shunt capacitor[J]. Power Capacitor, 1993(2): 34-37.
- [15] 民用建筑电气设计标准: GB 51348—2019[S]. 2019.
- Standard for electrical design of civil buildings: GB 51348—2019[S]. 2019.
- [16] 赵萌萌, 江新峰, 胡琴洪, 等. SVG在光伏电站无功补偿中的应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(3): 35-38.
- ZHAO Mengmeng, JIANG Xinfeng, HU Qin hong, et al. Application of SVG to reactive compensation of photovoltaic power plant[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(3): 35-38.
- [17] 安居. SVG在诏安桥东10 MWp光伏电站无功补偿中的应用[J]. 中国设备工程, 2018(20): 139-141.
- AN Ju. Application of SVG in reactive power compensation of Zhaoanqiaodong 10 MWp photovoltaic power station[J]. China Plant Engineering, 2018(20): 139-141.
- [18] 朱俊, 余澜明, 胡龙龙. 动态无功补偿装置SVG在光伏电站的应用[J]. 建材与装饰, 2016(39): 233-234.
- ZHU Jun, YU Lanming, HU Longlong. Application of dynamic reactive power compensation device SVG in photovoltaic power station[J]. Construction Materials & Decoration, 2016(39): 233-234.
- [19] 王蒙, 李庆海, 葛景, 等. 提升新能源送出能力的多类型无功补偿装置优选[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(4): 8-13.
- WANG Meng, LI Qinghai, GE Jing, et al. Optimal selection of multiple types of reactive power compensation devices enhancing new energy delivery capacity[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(4): 8-13.
- [20] 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. 2012.
- Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system GB/T 19964—2012[S]. 2012.
- [21] 张胜红. 浅析分布式光伏电站用户侧并网无功补偿方案[J]. 智能城市, 2018, 4(20): 154-155.
- ZHANG Shenghong. Analysis of distributed photovoltaic power station user side grid reactive power compensation scheme[J]. Intelligent City, 2018, 4(20): 154-155.
- [22] 陈良. 光伏阵列最大功率点跟踪的线性连续动态寻优策略[J]. 西安工程大学学报, 2017, 31(5): 612-619.
- CHEN Liang. Linear dynamic continuous optimization strategy of MPPT for photovoltaic systems[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2017, 31(5): 612-619.
- [23] 荣雅君, 冯海潮, 宋立伟, 等. 基于自适应遗传算法含光伏电源的配电网无功优化[J]. 电器与能效管理技术, 2020(11): 85-91.
- RONG Yajun, FENG Haichao, SONG Liwei, et al. Reactive power optimization of distribution network with photovoltaic power supply based on adaptive genetic algorithm[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(11): 85-91.
- [24] 林翔, 方健, 王红斌, 等. 计及风光荷相关性的变压器运行风险的概率评估方法[J]. 变压器, 2022, 59(1): 28-33.
- LIN Xiang, FANG Jian, WANG Hongbin, et al. Probabilistic assessment of transformer operating risk considering correlation among wind power, photovoltaic and load[J]. Transformer, 2022, 59(1): 28-33.
- [25] 黄柏强, 陈建基, 李盛佳, 等. 分时电价背景下光伏出力园区电动汽车的有序充电策略[J]. 电器与能效管理技术, 2022(9): 58-65.
- HUANG Baiqiang, CHEN Jianji, LI Shengjia, et al. Orderly charging strategy of electric vehicle in PV output park under time-of-use price[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(9): 58-65.

- [26] 张晓英, 侯秉臣, 王琨, 等. 基于改进天牛须算法的含固态变压器的配电网无功优化[J]. 高压电器, 2022, 58(11): 221-229.
- ZHANG Xiaoying, HOU Bingchen, WANG Kun, et al. Reactive power optimization of distribution network with solid state transformer based on improved beetle antennae search algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11): 221-229.
- [27] 陈飞, 宋磊, 孙业荣, 等. 风力发电低频输电用变压器的关键技术[J]. 变压器, 2022, 59(12): 23-27.
- CHEN Fei, SONG Lei, SUN Yerong, et al. Key technologies of low-frequency transmission transformers for wind power generation[J]. Transformer, 2022, 59(12): 23-27.
- [28] 乔春雨, 易建波, 谷宇杰, 等. 基于虚拟同步机技术的光储协控无功优化策略[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(6): 129-136.
- QIAO Chunyu, YI Jianbo, GU Yujie, et al. Reactive power optimization strategy of photovoltaic and energy storage co-control based on virtual synchronous generator[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 129-136.
- [29] 张红颖, 陈宁, 刘刚, 等. 考虑多场景参数灵敏度的光伏有功优化方法[J]. 西安工程大学学报, 2022, 36(5): 102-110.
- ZHANG Hongying, CHEN Ning, LIU Gang, et al. Photovoltaic active power parameters optimization method considering multi-scenario and parameter sensitivity[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2022, 36(5): 102-110.
- [30] 朱艺新, 于昊天, 张小兵. 分布式屋顶光伏接入下并网功率平衡控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(7): 134-140.
- ZHU Yixin, YU Haotian, ZHANG Xiaobing. Control method of grid-connected power balance under distributed rooftop photovoltaic access[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(7): 134-140.
- [31] 王云会, 郑强仁, 郭森, 等. 含分布式电源与多元化负荷的配电网可靠性提升研究[J]. 电器与能效管理技术, 2022(2): 63-67.
- WANG Yunhui, ZHENG Qiangren, GUO Miao, et al. Reliability improvement of distribution network with distributed generation sources and diversified loads[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(2): 63-67.
- [32] 电流互感器和电压互感器选择及计算规程: DL/T 866—2015[S]. 2015.
- Code for selection and calculation of current transformer and voltage transformer; DL/T 866—2015[S]. 2015.
- [33] 电能质量公用电网谐波: GB/T 14549—1993[S]. 1993.
- Quality of electric energy supply harmonics in public supply network; GB/T 14549—1993[S]. 1993.
- [34] 朱建群, 刘建, 毛俊海, 等. 分布式光伏电站接入配电网后功率因数降低的解决方案[J]. 太阳能, 2018(4): 42-43.
- ZHU Jianqun, LIU Jian, MAO Junhai, et al. After the distributed photovoltaic power station is connected to the distribution network[J]. Solar Energy, 2018(4): 42-43.
- [35] 分布式电源接入电网技术规定: Q/GDW 1480—2015[S]. 2015.
- Technical rule for distributed resources connected to power grid: Q/GDW 1480—2015[S]. 2015.
- [36] 光伏电站设计规范: GB 50797—2012[S]. 2012.
- Code for design of photovoltaic power station; GB 50797—2012[S]. 2012.
- [37] 国家电网公司. 分布式光伏发电项目接入系统典型设计[Z]. 2012.
- STATE GRID Corporation of China. Typical design of distributed photovoltaic power generation project access system [Z]. 2012.

作者简介:

邵红星(1988—), 男, 高级工程师, 从事光伏、电力、建筑电气设计及研发工作。E-mail: 408294021@qq.com。