

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180936

光伏发电直流侧共模电压干扰的抑制研究

张举良¹, 高志强², 董全智³, 郭改霞⁴, 焦丽娜³, 马仪成⁵

(1. 许昌学院, 河南 许昌 461000; 2. 沈阳工程学院, 辽宁 沈阳 110136; 3. 许昌许继风电科技有限公司, 河南 许昌 461000; 4. 河南许继仪表有限公司, 河南 许昌 461000; 5. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 光伏电站直流监测系统的放电管持续闪烁放电会导致通信异常和印制板烧毁, 阐述了其排查、分析和处理方法。通过对现场测试波形曲线、干扰源耦合通道、印制板通信防雷回路等方面进行分析, 得出其主因是由逆变器开关管工作过程中对地产生的共模电压未得到有效抑制而引起的。经过现场设备电路接地回路改造并测试验证, 问题得到有效解决。在光伏电站投运前应对各相关设备及电磁干扰进行专门严格的设计和检测, 可有效地抑制共模电压, 提高系统性能。

关键词: 智能光伏汇流箱; 光伏逆变器; 过电压保护器; 共模电压; 电磁干扰; 接地

Research on suppression of photovoltaic DC side common-mode voltage interference

ZHANG Juliang¹, GAO Zhiqiang², DONG Quanzhi³, GUO Gaixia⁴, JIAO Lina³, MA Yicheng⁵

(1. Xuchang University, Xuchang 461000, China; 2. Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China; 3. Xuchang XJ Wind Power Technology Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 4. Henan Xuji Instrument Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 5. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: The abnormal communication and PCB burning will occur due to the continuous flashing of the discharge-tube in the DC monitoring system in the PV power generation station. Thus this paper elaborates how to find the problem, make an analysis and shoot the troubles. Through the analysis of the test waveform, the coupling channel of the interference source, the communication lightning protection circuit of the PCB and so on, it concludes that accident is mainly caused by the common-mode voltage in the inverter switch-tube has not been effectively restrained during runtime. After the transformation of the grounding circuit of the equipment, through test and verification, the problem is effectively solved. In order to suppress common mode voltage and improve system performance, it is necessary to design and test the relevant equipment and EMI strictly before the photovoltaic power station is put into operation.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5292C0140113).

Key words: smart PV combiner box; photovoltaic inverter; over-voltage protector; common-mode voltage; electromagnetic interference; grounding

0 引言

共模干扰也称为纵模干扰、不对称干扰或接地干扰。噪声电流在相线和中性线上各流过一部分, 以地为公共回路。共模干扰对于工作中的设备危害很大, 尤其是对于光伏发电系统而言, 因为在光伏系统中, 需要数量庞大的光伏电池组件进行串并组合达到需要的电压电流值, 以使发电效率达到最佳^[1]。在串并联的过程中连线将有可能造成接地公共回路中的共模电流增加, 危害到相关的元器件^[2]。其中

智能光伏汇流箱是最主要的受害对象之一, 它的主要作用就是对光伏电池阵列的输入进行一级汇流及检测, 用于减少光电池阵列接入到逆变器的连线, 优化系统结构, 提高可靠性和易于维护。智能光伏汇流箱不仅具有汇流、防雷的功能, 而且还具有监测光伏电池组件汇流前的运行状态和汇流后的电流、电压、功率, 防雷器状态、直流断路器状态采集, 继电器接点输出等功能^[3]。本文针对某 20 MWp 光伏电站的一起智能光伏汇流箱与某品牌光伏逆变器互连, 并在正常运行情况下造成的汇流箱内通信模块放电管损坏并烧毁印制板的事件进行研究, 分析了引起通信模块放电管烧损的原因, 并给出了解

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5292C0140113)

决此类问题的方法。

1 光伏电站事故介绍

并网光伏电站如图 1 所示,它主要由光伏阵列、功率变换器、控制装置等组成^[4]。此类系统的特点就是把太阳能电池组件产生的电能经过并网逆变器转换成符合市电网要求的交流电后直接并入公用电网^[5]。

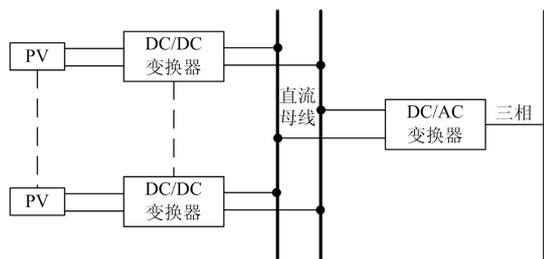


图 1 并网光伏电站的组成

Fig. 1 Composition of grid-connected photovoltaic power station

本文研究的实际案例中的光伏电站由 20 个 1 MWp 光伏发电子系统组成,每个发电子系统的电能汇至 10 kV 的母线后,经一台容量为 25 000 kVA 升压并网变压器升压至 110 kV,以 1 回 110 kV 线路送至站外 220 kV 变电站的 110 kV 侧并入电网。该电站光伏方阵内共安装 280 台智能光伏汇流箱 (16 支路)、40 台 500 kW 光伏逆变器及 20 台箱式变压器。其中每 7 台智能光伏汇流箱间通信线以“菊花链”方式^[6]接入综自数据通信柜中,光伏汇流箱采用 RS-485 串行通信标准。光伏汇流箱间通信线采用屏蔽层单点接地方式连接,如图 2 所示。

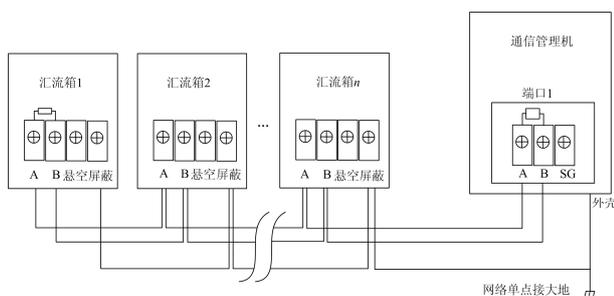


图 2 通信线“菊花链”接线方式

Fig. 2 Daisy-chain connection mode of communication line

在并网发电两个月期间,与某品牌光伏逆变器电气互连的个别光伏汇流箱内出现通信回路过电压保护器件放电管持续闪烁放电情况,甚至引起放电管损坏及印制板烧毁。据初步统计,与此品牌光伏逆变器互连并出现通信模块放电管烧损现象的光伏汇流箱占光伏汇流箱总数的 50% 以上。

2 事故现象原因分析

从现场事故的现象来看,只有部分光伏逆变器发生事故,而且是在正常工作一段时间之后才发生,因此有可能是工作过程中存在一定的干扰源,在干扰源的持续作用下,引起过电压或者过电流。为找出问题的结症,本文从以下几方面分析。

2.1 干扰源分析

某品牌单台光伏逆变器共接入 7 台光伏汇流箱,断开其中 6 台光伏汇流箱的输出断路器,并将剩余 1 台光伏汇流箱的通信线从通信模块电路板中拆除。此时用示波器测试,光伏汇流箱正、负母线对地交流电压幅值分别为 516.0 V AC、480.0 V AC,二次通信回路 A、B 端对地电压幅值分别为 239.0 V AC (58.32 kHz)、192.0 V AC (2.316 MHz)。断开该汇流箱内输出断路器,再测试母线正负极对地、通信回路 A、B 端对地,未检测到交流电压。因此,可初步判定交流谐波干扰来源来自逆变器运行过程中产生的共模电压。共模电压主要来源方式是由外界电磁场在电缆中的所有导线上感应出来的电压,这个电压产生干扰电流^[7];另一个原因是由于电缆两端的设备所接地电位的存在,在这个地电压的驱动下产生电流^[8];第三个原因是设备的电缆与大地之间有电位差,这种电缆上也会有共模电流。在电磁场中导线电场和磁场的表达式为

$$E_r = \frac{IL\beta^2}{2\pi W\epsilon_0} \left[\frac{1}{(\beta r)^2} + \frac{1}{j(\beta r)^3} \right] \cos\theta \quad \text{V/m} \quad (1)$$

$$H_\phi = \frac{IL\beta^3}{2\pi W\epsilon_0} \left[\frac{-1}{j(\beta r)} + \frac{1}{(\beta r)^2} \right] \sin\theta \quad \text{A/m} \quad (2)$$

$$H_\theta = \frac{I\beta^3}{4\pi} \left[\frac{-1}{j(\beta r)} + \frac{j}{(\beta r)^2} + \frac{1}{(\beta r)^3} \right] \sin\theta \quad \text{A/m} \quad (3)$$

式中: E_r 为球坐标系电场 r 表达式; H_ϕ 为球坐标系磁场 ϕ 方向表达式; H_θ 为球坐标系磁场 θ 方向表达式; I 为流过导线的电流; L 为导线长度; ϵ_0 为介电常数; β 为相位常数; A 为磁矢量; θ 为法线矢量与磁感应强度的夹角; ϕ 为过磁感应强度和点在 zox 平面的夹角。

正确分析出开关电源中干扰源是由于电场还是磁场引起的,对确定干扰源的性质、分析干扰耦合通道,进而采取相应的抑制措施有很大的帮助^[9]。

2.2 波形图分析

采用示波器分别对光伏汇流箱正、负母线对地及通信回路 A、B 端对地进行测试,具体结果如图 3—图 6 所示。

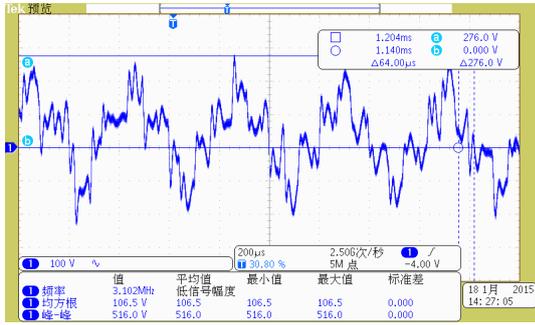


图 3 母线正极对地电压波形图

Fig. 3 Waveform graph of bus positive voltage to ground

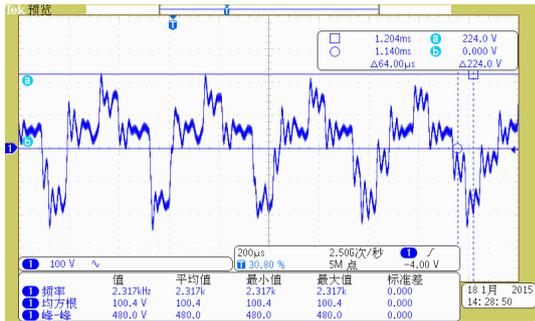


图 4 母线负极对地电压波形图

Fig. 4 Waveform graph of bus negative voltage to ground

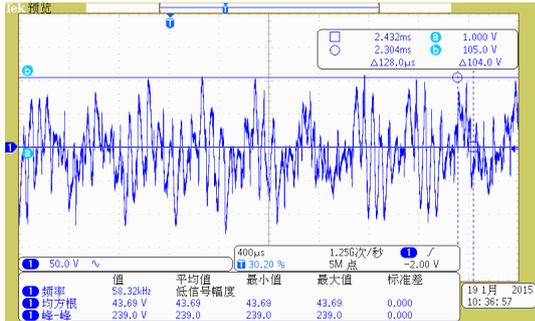


图 5 通信回路 A 端对地电压波形图

Fig. 5 Waveform graph of communication circuit A side voltage to ground

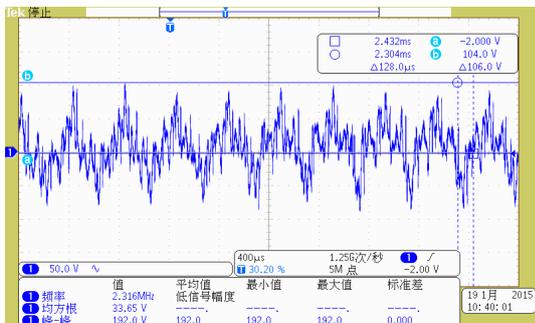


图 6 通信回路 B 端对地电压波形图

Fig. 6 Waveform graph of communication circuit B side voltage to ground

2.3 交流干扰源耦合到通信回路路径分析

经分析：光伏逆变器开关管工作过程中会对地产生共模电压^[10]，由于某品牌光伏逆变器未对此共模电压进行有效抑制，导致共模电压从光伏逆变器直流侧传到汇流箱正负母线，经电源模块输出、断路器辅助触点开入、测量板电压测量回路 3 种途径耦合到通信回路，经测试主要路径为电源模块输出、断路器辅助触点开入。放电管在上升陡度低于 100 V/s 的电压作用下，开始放电的平均电压值为 60 V，放电管在 1 kV/μs 上升陡度的瞬时电压脉冲作用下，开始放电的电压值为 700 V，由于耦合到通信回路的共模电压峰值及上升速度满足放电管动作条件，致使放电管持续闪烁放电，最终导致放电管损坏并烧毁印制板。

2.4 通信防雷回路分析

光伏汇流箱通信模块防雷设计依据标准《GB/T 18802.21-2004 低压电涌保护器 第 21 部分电信和信号网络的电涌保护器(SPD)-性能要求和试验方法》，符合标准雷击防护波形规范，其通信 RS-485 设计的信号防雷技术指标如表 1 所示。

表 1 光伏汇流箱信号防雷技术指标

Table 1 Technical data of signal lightning protection of PV combiner box

参数名称	参数值
标称电压(VDC)	5
最大持续工作电压(VDC)	6
限制电压/V	<12
标称放电电流/kA	10
试验波形 C2	10 kV 1.2/50 μs, 5 kA 8/20 μs

光伏汇流箱防雷设计回路如图 7 所示。F1 为三极气体放电管，通常采用 5 kA 75 V 或 90 V 规格，

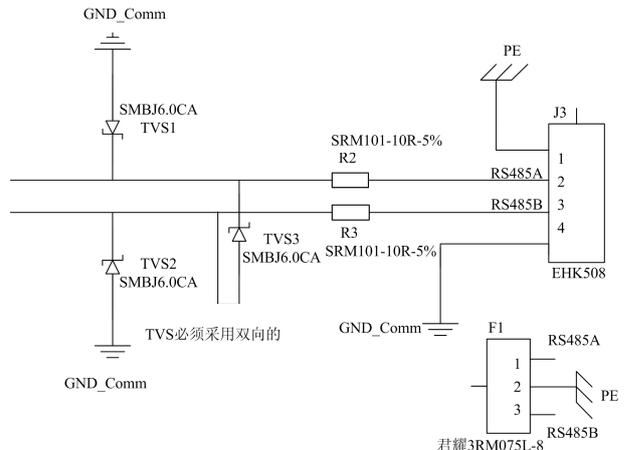


图 7 光伏汇流箱防雷设计原理图

Fig. 7 Design principle diagram of lightning protection of PV combiner box

作为共模和差模一级防雷保护, 该光伏汇流箱选用 3RM075-8; R_2 、 R_3 为 $2\text{ W}/4.7\ \Omega$ 电阻, 阻值在不影响信号传输质量的情况下可以再取大一些, 该光伏汇流箱选用 $1\text{ W}/10\ \Omega$; TVS 管 SMBJ6.0 A(工作电压 6.0, 限制 10.5 V), 作为后级的共模和差模保护的作用。

2.5 电路接地方式分析

地线分为安全地和信号地两种。前者是为了保证人身安全、设备安全而设置的地线, 后者是为了保证电路正确工作所设置的地线^[11]。造成电路干扰现象的主要是信号地, 因此本文仅针对信号地问题进行具体分析。

信号地接线方式有以下几种, 如图 8 所示。

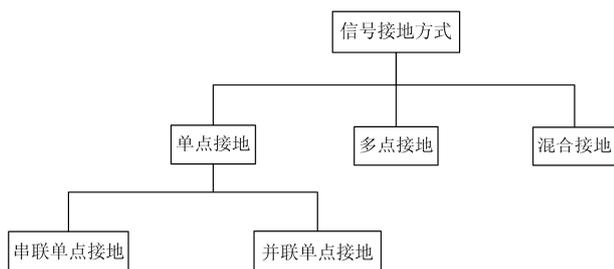


图 8 信号地接线方式结构图

Fig. 8 Structure diagram of signal ground connection mode

1) 单点接地: 如图 9 所示, 单点接地是为许多并联在一起的电路提供公共电位参考点的方法, 这样信号就可以在不同电路之间传输。若没有公共参考点, 就会出现错误信号传输。单点接地要求每个电路只接地一次, 并且接在同一点, 该点常常以地球为参考^[12]。由于只存在一个参考点, 因此可以相信没有地回路存在, 因而也就没有干扰问题^[13]。

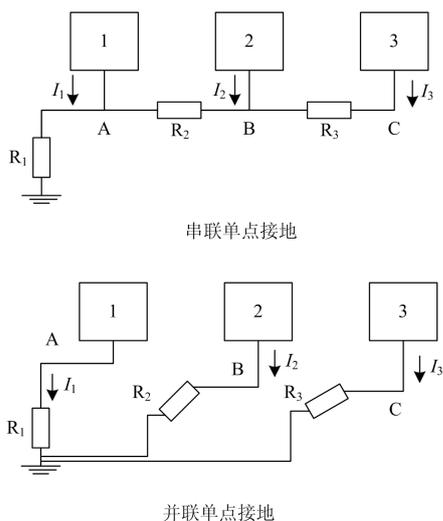


图 9 单点接地方式示意图

Fig. 9 Schematic diagram of single-point grounding mode

2) 多点接地: 如图 10 所示, 从图 10 中可以看出, 设备内电路都以机壳为参考点, 而各个设备的机壳又都以地为参考点。这种接地结构能够提供较低的接地阻抗, 这是因为多点接地时, 每条地线可以很短; 并且多根导线并联能够降低接地导体的总电感^[14]。在高频电路中必须使用多点接地, 并且要求每根接地线的长度小于信号波长的 $1/20$ 。

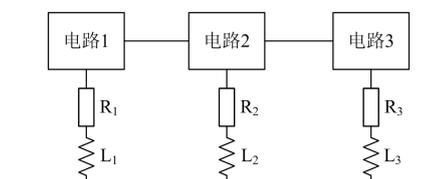


图 10 多点接地方式示意图

Fig. 10 Schematic diagram of multi-point grounding mode

3) 混合接地: 混合接地既包含了单点接地的特性, 又包含了多点接地的特性。例如, 系统内的电源需要单点接地, 而射频信号又要求多点接地^[15], 这时就可以采用图 11 所示的混合接地。对于直流, 电容是开路的, 电路是单点接地; 对于射频, 电容是导通的, 电路是多点接地。

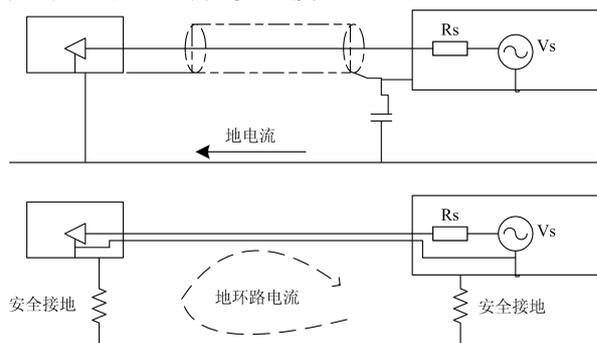


图 11 混合接地方式示意图

Fig. 11 Schematic diagram of hybrid grounding mode

当许多相互连接的设备体积很大(设备的物理尺寸和连接电缆与任何存在的干扰信号的波长相比很大)时, 就存在通过机壳和电缆的作用产生干扰的可能性。当发生这种情况时, 干扰电流的路径通常存在于系统的地回路中^[16]。

在考虑接地问题时, 要考虑两个方面的问题, 一个是系统的自兼容问题, 另一个是外部干扰耦合进地回路, 导致系统的错误工作^[17]。由于外部干扰常常是随机的, 因此解决起来往往更难。

根据以往长期成功经验, 可得出如下结论:

- 1) 单点接地要解决的问题就是针对“公共地阻抗耦合”和“低频地环路^[18]”;
- 2) 多点接地是针对“高频所容易通过长地走线产生的共模干扰^[19]”;

3) 低频电路中, 信号的工作频率小于 1 MHz, 它的布线和器件间的电感影响较小, 而接地电路形成的环流对干扰影响较大, 因而应采用单点接地;

4) 当信号工作频率大于 10 MHz 时, 地线阻抗变得很大, 此时应尽量降低地线阻抗, 应采用就近多点接地^[20];

5) 当工作频率在 1~10 MHz 时, 如果采用单点接地, 其地线长度不应超过波长的 1/20, 否则应采用多点接地法^[21];

6) 数字地与模拟地之间单点接地, 数字地之内多点接地。

根据如上结论, 结合现场实际布线情况及波形图, 本文所涉及光伏电站的情况与 e 项基本一致。

3 事故的处理及验证

3.1 现场整改

由于该电站光伏逆变器侧暂无法采取有效抑制共模电压的方案, 根据如上结论, 该电站组织将所有光伏汇流箱间的通信线接线方式由“屏蔽层单点接地”改为“屏蔽层多点接地”。

3.2 测试内容

用 YTC2571 数字接地电阻测试仪抽测了部分方阵光伏逆变器箱房和光伏汇流箱接地电阻; 用 MDO3104 泰克数字示波器抽测了 2#和 9#光伏方阵, 其中 2#方阵全部完成接地改造, 9#方阵未进行接地改造。分别对这两个方阵进行通信柜内数据测试和部分汇流箱内数据测试。

3.3 测试结果

如图 12 所示, 采用单点接地方式。经测量显示, 近接地端共模干扰信号幅值较小, 峰峰值为 10 V 左右; 远接地端共模干扰信号幅值较大, 峰峰值为 400 V 左右, 频率为几 k 到几百 k。

采用多点接地方式时, 且只有 1 台汇流箱接地。共模干扰信号明显减小, 共模干扰信号峰峰值为 40 V 左右, 如图 13 所示。

如图 14 所示, 采用多点接地方式, 且 7 台汇流箱全部接地。共模干扰信号峰峰值为 10 V 左右, 如图 15 所示。

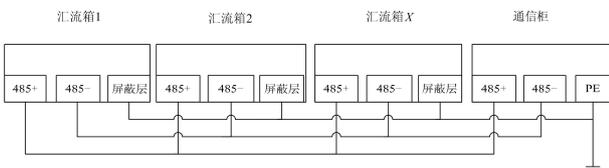


图 12 光伏汇流箱单点接地示意图

Fig. 12 Schematic diagram of single-point grounding mode of PV combiner box

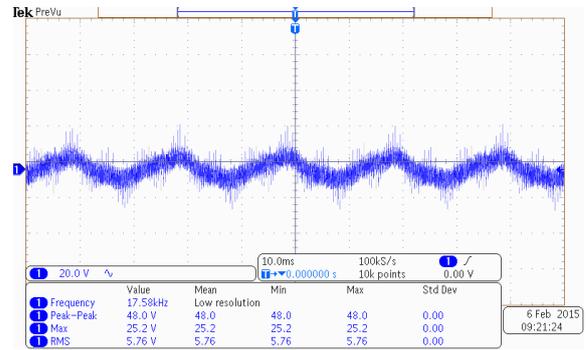


图 13 多点接地—仅 1 台汇流箱接地, 通信回路对地波形图

Fig. 13 Waveform graph of communication circuit voltage to ground for the multi-point grounding mode-only one PV combiner box grounding

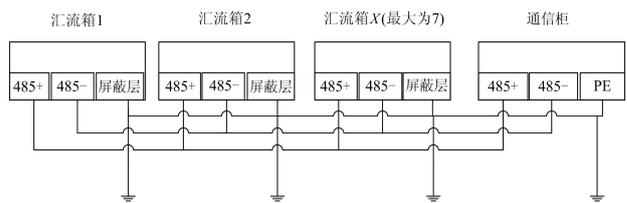


图 14 汇流箱多点接地示意图

Fig. 14 Schematic diagram of multi-point grounding mode of PV combiner box

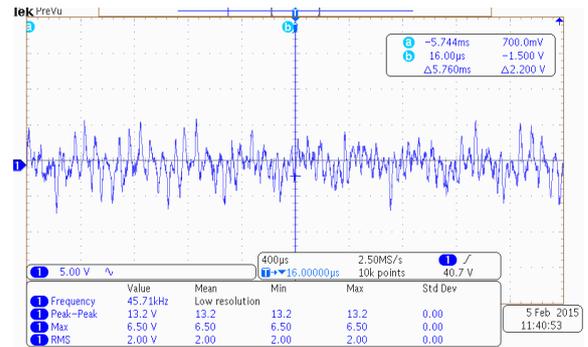


图 15 多点接地—7 台汇流箱全部接地, 通信回路对地波形图

Fig. 15 Multi-point grounding mode-waveform graph of communication circuit voltage to ground and all 7 PV combiner boxes grounding

经过测量, 现场接地良好, 接地电阻均小于 0.3 Ω。

3.4 验证结论

现场改造方案采用多点接地方式, 且每串汇流箱通信屏蔽全部接地。经过验证, 该方案能有效降低通信线上的共模干扰, 干扰电压峰峰值 400 V 左右降低为 10 V 左右。采用多点接地方式时, 通信线屏蔽层电流峰峰值为 1 A 左右, 经过现场检测验证

及运行, 再无放电管闪烁及损坏的现象发生, 很好地处理了共模电压干扰引起的光伏发电事故。

4 结语

本文针对一起智能光伏汇流箱内通信模块放电管损坏并烧毁印制板事故, 从主要干扰源入手, 通过对现场测试波形曲线、干扰源耦合通道、印制板通信防雷回路等方面进行分析, 找到交流谐波干扰源来自光伏逆变器运行过程中产生的共模电压。充分考虑经济、可靠、科学等因素, 经过对智能光伏汇流箱通信回路接地方式进行改造, 最终科学有效地解决了现场问题。本文对各光伏电站处理光伏发电直流侧的共模电压干扰问题提供了一种有效的解决方案。

参考文献

- [1] FENG L, ZHANG J, LI G, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 86-94. DOI: 10.1186/s41601-016-0021-1.
- [2] 舒成维, 王承民, 谢宁. 一种基于坐标变换的剩余电流提取方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(15): 111-119.
SHU Chengwei, WANG Chengmin, XIE Ning. A method used to extract different components of residual current based on coordinate transformation[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(15): 111-119.
- [3] 张勇成, 田介花. 分布式光伏发电系统优化设计探讨[J]. *太阳能*, 2017(8): 25-27, 39.
ZHANG Yongcheng, TIAN Jiehua. Optimization design of distributed photovoltaic power generation system[J]. *Solar Energy*, 2017(8): 25-27, 39.
- [4] 陈会杰, 禹士朋. 电力通信网可靠性研究[J]. *数字通信世界*, 2016(3): 67.
CHEN Huijie, YU Shipeng. Research on reliability of power communication network[J]. *Digital Communication World*, 2016(3): 67.
- [5] LIU J, YANG D, YAO W, et al. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 429-437. DOI: 10.1186/s41601-017-0070-0.
- [6] 黄永忠, 于朝凯, 周晓明, 等. 分布式光伏电站数据通讯管理机的设计[J]. *中国计量大学学报*, 2017, 28(3): 394-398.
HUANG Yongzhong, YU Chaokai, ZHOU Xiaoming, et al. Design of CHITIC distributed photovoltaic plants data management units[J]. *Journal of China University of Metrology*, 2017, 28(3): 394-398.
- [7] 李奎, 韩振铎, 牛峰, 等. 非隔离型光伏并网逆变器共模电流抑制[J]. *电气传动*, 2017, 47(6): 23-27, 35.
LI Kui, HAN Zhenduo, NIU Feng, et al. Common mode current suppression for non-isolated photovoltaic grid-connected inverters[J]. *Electric Drive*, 2017, 47(6): 23-27, 35.
- [8] 陈素华. 有限集预测控制减少三相电压源逆变器共模漏电流方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(22): 136-141.
CHEN Suhua. Finite set control model predictive control method to reduce common-mode leakage for three-phase voltage source inverter[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(22): 136-141.
- [9] 袁顺刚, 刘玉琦, 常志国, 等. 开关电源电磁干扰及其抑制技术的分析[J]. *数字通信世界*, 2018(3): 119.
YUAN Shungang, LIU Yuqi, CHANG Zhiguo, et al. Analysis of electromagnetic interference and its suppression technology for switching mode power supply[J]. *Digital Communication World*, 2018(3): 119.
- [10] 韩素敏, 吴晓静, 苗纪青. DC-DC 变换器的差模传导干扰耦合通道建模分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(7): 123-128.
HAN Sumin, WU Xiaojing, MIAO Jiqing. Modeling of differential mode conducted interference coupling channel of a DC-DC converter[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(7): 123-128.
- [11] 满建真, 黄国华, 李越. 电路接地的方法与计算[J]. *探索科学*, 2016(9): 61.
MAN Jianzhen, HUANG Guohua, LI Yue. Method and calculation of circuit grounding[J]. *Explore Science*, 2016(9): 61.
- [12] 王健, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 光伏站内用直流微网的接地方式分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(15): 164-170.
WANG Jian, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Analysis of grounding mode of DC micro grid in PV station[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(15): 164-170.
- [13] 王建国, 周璧华, 杨波. 屏蔽室接地位置不同对其屏蔽效能的影响研究[J]. *电波科学学报*, 2012(1): 45-49, 65.
WANG Jianbao, ZHOU Bihua, YANG Bo. Influence of grounding locations on shielding effectiveness of shielded room [J]. *The Chinese Journal of Radio Science*, 2012(1): 45-49, 65.

- [14] 李怡恒. 开关电源的电磁干扰抑制分析[J]. 电子技术与软件工程, 2016(22): 103.
LI Yiheng. Analysis of electromagnetic interference suppression in switching power supply[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2016(22): 103.
- [15] 梁霄. 基于网络的射频信号预处理器设计[J]. 无线互联科技, 2016(13): 9-11.
LIANG Xiao. Design of radio frequency signal preprocessor based on network[J]. Wireless Internet Technology, 2016(13): 9-11.
- [16] 张浩, 陈良亮, 齐连伟, 等. 不同屏蔽措施对电磁干扰抑制的研究[J]. 现代电子技术, 2018(7): 93-96.
ZHANG Hao, CHEN Liangliang, QI Lianwei, et al. Research on EMI suppression with different shielding measures[J]. Modern Electronics Technique, 2018(7): 93-96.
- [17] 李升, 姜程程, 赵之瑜, 等. 分布式光伏电站接入低压配电网系统暂态电压稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 67-72.
LI Sheng, JIANG Chengcheng, ZHAO Zhiyu, et al. Study of transient voltage stability for distributed photovoltaic power plant integration into low voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 67-72.
- [18] 崔勇, 杨世武, 刘志明, 等. 铁路信号电缆屏蔽及接地方式的研究分析[J]. 铁道学报, 2017, 39(11): 77-82.
CUI Yong, YANG Shiwu, LIU Zhiming, et al. Research on shielding and earthing methods of railway signal cables[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(11): 77-82.
- [19] 郭小强, 魏宝泽, 杨秋霞, 等. 六开关光伏并网逆变器共模漏电流抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 101-105.
GUO Xiaoqiang, WEI Baoze, YANG Qiuxia, et al. Leakage current suppression method with a novel six-switch photovoltaic grid-connected inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 101-105.
- [20] 张旭泽, 郑永康, 康小宁, 等. 智能变电站继电保护系统所面临的若干问题[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 90-96.
ZHANG Xuze, ZHENG Yongkang, KANG Xiaoning, et al. Several problems of intelligent substation relay protection system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 90-96.
- [21] 凌林玉. 印制电路板的抗干扰性设计[J]. 电子测试, 2017(5): 93-94.
LING Linyu. Anti-jamming design of printed circuit board[J]. Electronic Test, 2017(5): 93-94.

收稿日期: 2018-07-25; 修回日期: 2018-11-28

作者简介:

张举良(1975—), 男, 硕士, 正高级工程师, 九三学社, 从事继电保护、电力系统自动化及光伏发电研究工作;
E-mail: juliangzh@126.com

高志强(1976—), 男, 博士, 副教授, 从事继电保护、电力系统自动化及光伏发电研究工作;

董全智(1988—), 男, 学士, 工程师, 从事光伏发电系统产品调试及售后服务工作。

(编辑 周金梅)