

光伏电站高电压穿越试验中有功功率异常跌落分析

王智高, 王弋飞, 范伟强, 韩辰光

(西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077)

摘要: 近年来光伏电站建设飞速发展,光伏电站涉网试验是确保光伏电站能够安全、稳定并入电网并正常运行的一系列重要测试。本文以某光伏电站发电单元高电压穿越试验过程为例,介绍了高电压穿越试验方法及试验过程,分析了有功功率异常跌落的原因,为同类试验中类似情形提供参考,也为光伏电站建设期间变压器选型提供借鉴。

关键词: 高电压穿越; 光伏电站; 有功功率; 变压器

Analysis of Abnormal Drop of Active Power in High Voltage Ride-through Tests for Photovoltaic Power Station

WANG Zhigao, Wang Yifei, FAN Weiqiang, HAN Chenguang

(Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: In recent years, the construction of photovoltaic power station has developed rapidly and the grid-connected test of photovoltaic power station is a series of important tests to ensure safe and stable connection of the photovoltaic power station to the power grid as well as normal operation. In this paper, the high-voltage ride-through test process of a certain photovoltaic power station is taken as an example, the high voltage ride-through test method and process are introduced and the reasons for the abnormal drop of active power is analyzed, which provide reference not only for similar situations in same type of tests, but also for type selection of transformer during the construction of photovoltaic power station.

Keywords: high voltage ride-through; photovoltaic power station; active power; transformer

0 引言

在“双碳”政策背景下,新能源技术具有显著的优势,光伏发电作为清洁能源之一受到越来越多的关注^[1-4]。电站建设完成后,必须经过严格的试验才能并网,光伏电站涉网试验是确保光伏电站能够安全、稳定地并入电网并正常运行的一系列重要测试。这些试验旨在评估光伏电站在实际电网环境中的适应性、稳定性和安全性,为电力系统的稳定运行提供有力保障^[5]。其中高电压穿越试验通过在被测光伏发电单元高压侧施加一定时间间隔的高电压来模拟高压侧对称故障或不对称故障以检验光伏发电单元的故障穿越能力^[6-9]。

1 高电压穿越试验介绍

光伏电站高电压穿越能力指当电力系统事故或扰动引起光伏电站并网点电压升高时,在一定的

电压升高范围和时间间隔内,光伏电站能够不脱网连续运行的能力^[10-16]。

光伏电站高电压穿越试验能够模拟电网电压骤升的实际工况,检验逆变器在电压骤升时是否具备有功功率连续调节的能力以及向电力系统注入无功电流的能力,确保光伏逆变器能够在电压异常情况下不脱网运行,还能够为电网提供支撑作用,从而避免电网因电压波动而出现故障或停电事故,这对于维护电网的安全稳定运行具有重要意义^[17-23]。

2 高电压穿越试验方法

2.1 技术要求

根据 GB/T 19964—2024《光伏发电站接入电力系统技术规定》,光伏电站高电压穿越要求如下^[24]:

1) 光伏发电站并网点电压升高时,光伏逆变器能够不脱网连续运行一定时间。光伏电站高电压穿越技术要求见图 1。

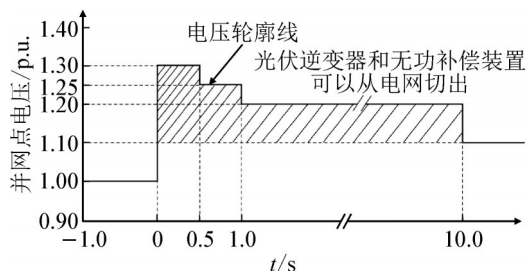


图1 光伏电站高电压穿越技术要求
Fig. 1 Technical requirement for high voltage ride-through of photovoltaic power station

2)当光伏电站并网点电压升高时,光伏发电站应具备动态无功电流支撑能力。

3)并网点电压升高期间,在满足动态无功电流支撑的前提下,光伏电站应具备有功功率控制能力,应综合利用光伏逆变器、储能系统实现整站有功功率控制,尽量保持故障前有功功率不变。光伏电站内的光伏逆变器在高电压穿越期间的有功功率控制要求应满足 GB 37408。

根据 GB/T 37408—2019《光伏发电并网逆变器技术要求》,光伏电站高电压穿越有功功率考核要求如下^[25]:高电压穿越期间未脱网的逆变器,其电网故障期间输出的有功功率应保持与故障前输出的有功功率相同,允许误差不应超过 $10\%P_n$ 。

2.2 接线方式

高电压穿越能力检测测试的一次回路图如图2所示,断开被测光伏发电单元升压变压器与35 kV母线的连接,将电网模拟装置串入其中,并通过数据采集装置采集升压变压器高压侧电压及电流。

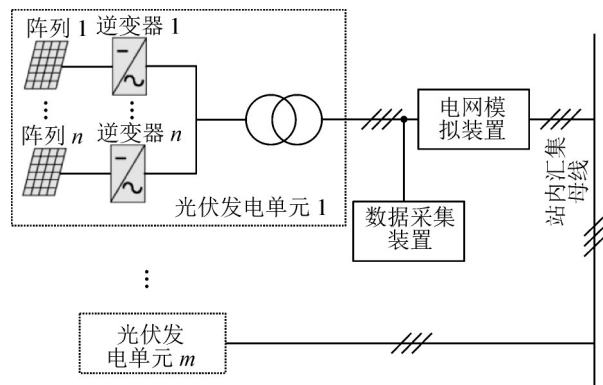


图2 高电压穿越试验接线原理图
Fig. 2 Wiring schematic diagram of high voltage ride-through test

2.3 试验步骤

根据高电压穿越相关标准要求,高电压穿越试验内容包括空载试验和负载试验,本文以130%三相对称高电压穿越为例,其负载试验步骤如下:

- 1)电网模拟装置输出标称电压;
- 2)启动被测光伏发电单元逆变器,待其输出功

率达到额定功率的10%~30%之间,进行小功率高电压穿越试验,调节电网模拟装置输出对称电压 $130\% U_n$,持续运行500 ms,记录电压故障前10 s和恢复后6 s的电压、电流波形数据;

3)重复步骤2)一次;

4)待光伏逆变器输出功率达到额定功率的70%以上,进行大功率高电压穿越试验,重复步骤2)和3)。

3 高电压穿越现场试验

3.1 电网模拟装置介绍

目前西高院拥有5套电网适应性检测平台,其中一种电力电子型的电网模拟装置,主要由输入开关柜、输出开关柜、旁路开关柜、功率柜、降压变压器、升压变压器、站用变压器、负荷开关柜、集装箱及上位机操作系统及软件等组成。其功率单元主要包括整流器和逆变器两个部分;先通过降压变压器将电网侧的35 kV/10 kV变为三相380 V的交流电压,再经过整流器整流后得到稳定的直流电压,由于采用PWM整流技术,电网侧谐波含量能够得到有效控制;然后将直流电压经过三组模块级联的单相逆变器和三个单相隔离升压变压器输出为35 kV/10 kV三相交流电压,通过调节电源输出相电压有效值、频率、相位等模拟电网的正常、异常特性(如模拟光伏电站或者风机并网中电网侧的闪变以及三相对称或不对称高/低电压穿越能力)。本设备电气原理图见图3。

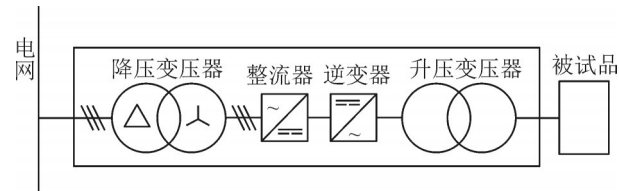


图3 电网适应性检测平台原理图
Fig. 3 Principle diagram of suitability detection platform of power grid

3.2 试验现场介绍

以云南省某光伏电站8号发电单元高电压穿越试验为例,试验现场见图4,该发电单元参数如下:

光伏板型号:JKM580N-72HL4-BDV;

逆变器型号:SG320HX;

逆变器额定输出功率:320 kW;

箱变型号:3200 kVA;

连接方式:10台相同型号逆变器并联汇总接入箱变低压侧;

数据采集装置:TRIONet 功率分析仪;

试验项目:大功率 1.3 倍三相对称高电压穿越。



图4 高电压穿越试验现场
Fig. 4 High voltage ride- through test site

3.3 试验结果

试验时数据采集装置同步记录箱变高压侧电压和电流,计算并绘制三相线电压、基波正序电压与时间的关系曲线,有功功率与时间的关系曲线见图 5,试验数据见表 1。

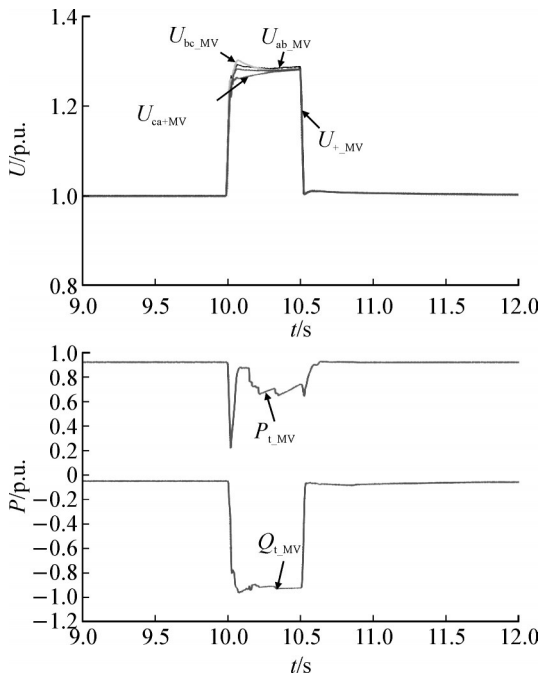


图5 大功率 1.3 倍三相对称高电压穿越高压侧有功功率波形图
Fig. 5 Active power waveform at high voltage side of high power 1.3 x three-phase symmetrical high voltage ride-through

表1 大功率 1.3 倍三相对称高电压穿越高压侧有功功率数据
Table 1 Active power data at high voltage side of high power 1.3 x three-phase symmetrical high voltage ride- through

名称	参数
电压升高点目标值 /p.u.	1.3
电压升高点实测值 /p.u.	1.28
电压升高持续时间 /s	0.5
电压升高前有功功率 /p.u.	0.91
电压升高期间平均有功功率 /p.u.	0.71
电压升高期间有功功率瞬时最大跌幅 /p.u.	0.28
是否脱网	否

由图 5 分析可知,当电压抬升至 1.3 倍额定电压时,逆变器持续运行 0.5 s 未脱网,但有功功率在电压抬升期间瞬时最大幅度超过标准要求的 10% 额定功率。经反复检查和试验,逆变器高电压穿越参数无误。

光伏逆变器和电网模拟装置中间有升压变压器,根据变压器的特性,当变压器一次侧电压过高时,会产生较大的励磁电流,严重时会导致磁饱和,变压器损耗增加,降低其能量传输效率。因此,初步怀疑是变压器在 1.3 倍高电压穿越期间,由于励磁电流较大引起有功功率大幅度损失。

为了验证以上猜想,将数据采集装置接到箱变低压侧,重新采集 1.3 倍高电压穿越时变压器低压侧的数据,试验波形见图 6,试验数据见表 2。

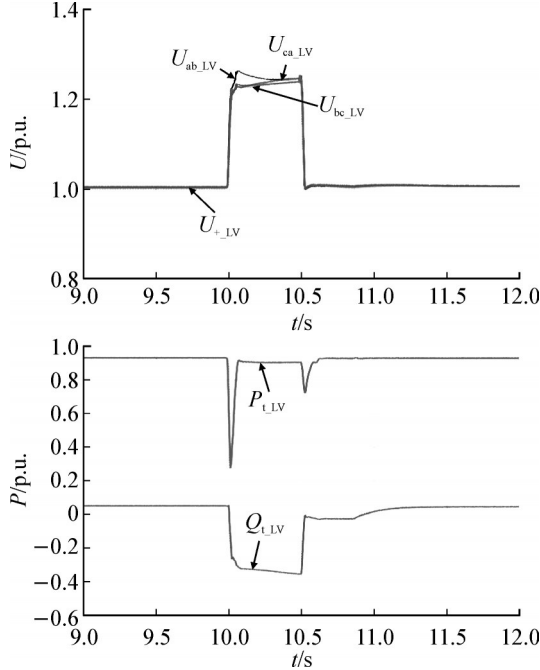


图6 大功率 1.3 倍三相对称高电压穿越低压侧有功功率波形图
Fig. 6 Active power waveform at low voltage side of high power 1.3 x three-phase symmetrical high voltage ride- through

表2 大功率 1.3 倍三相对称高电压穿越低压侧有功功率数据
Table 2 Active power data at low voltage side of high power 1.3 x three-phase symmetrical high voltage ride- through

名称	参数
电压升高目标值 /p.u.	1.3
电压升高实测值 /p.u.	1.23
电压升高持续时间 /s	0.5
电压升高前有功功率 /p.u.	0.92
电压升高期间平均有功功率 /p.u.	0.90
电压升高期间有功功率瞬时最大跌幅 /p.u.	0.02
是否脱网	否

由图 6 分析得知,箱变低压侧的有功功率在高穿期间保持稳定,未发生明显跌落,跌落值在标准要

求值以内,根据能量守恒原理,说明有功功率损失在变压器环节产生,而非逆变器性能不足导致。另外,低压侧电压升高实际值较高压侧电压升高实际值低,是因为逆变器发出无功电流,将低压侧电压拉低,起到了电压支撑的作用,是正常的。本项试验的考核点是变压器高压侧。作为对比,1.2倍高电压穿越时箱变高压侧和低压侧数据测试波形见图7和图8。

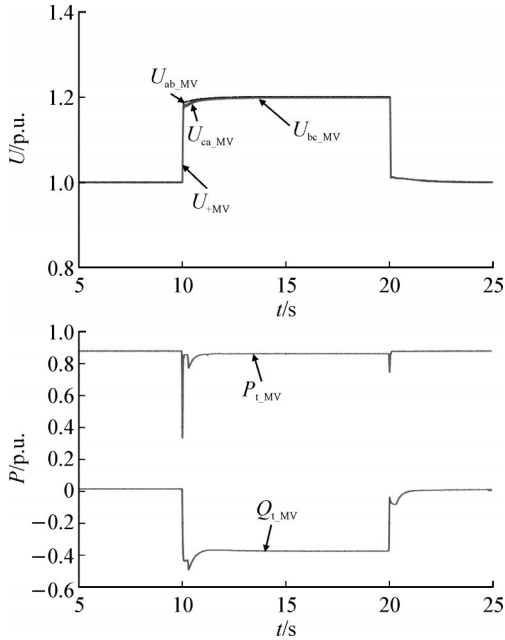


图7 大功率1.2倍三相对称高电压穿越高压侧有功功率波形图
Fig. 7 Active power waveform at high voltage side of high power 1.2 x three-phase symmetrical high voltage ride-through

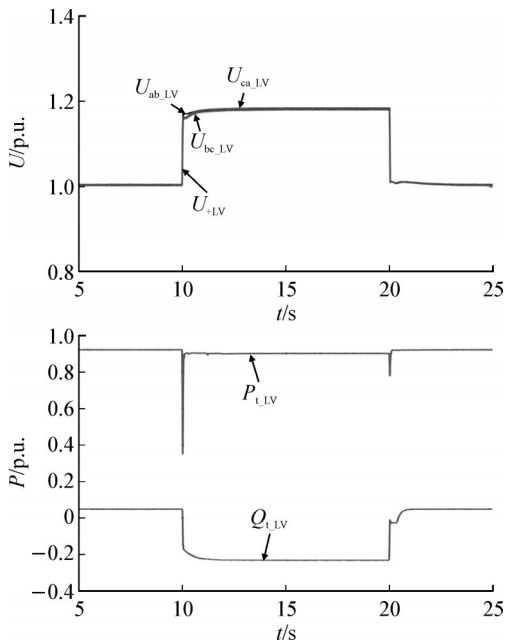


图8 大功率1.2倍三相对称高电压穿越低压侧有功功率波形图
Fig. 8 Active power waveform at low voltage side of high power 1.2 x three-phase symmetrical high voltage ride-through

图7-8波形显示变压器高、低压侧有功功率在穿越期间未发生明显跌落,乃电压幅值相对较低而变压器未饱和,有功损失较少的缘故。试验结果合格。

综上所述,大功率1.3倍三相对称高电压穿越试验中,变压器高压侧有功功率跌落较大,是由于变压器励磁电流较大造成的,而高电压穿越试验目的主要是考核逆变器性能,故该项试验认定为合格。

4 结语

1)光伏发电单元高电压穿越试验主要考核逆变器性能,但变压器性能不足会导致高电压穿越期间有功功率试验数据不合格,易导致错误判断认为逆变器性能不合格,这一点需在今后的试验中予以考虑。

2)光伏电站在设计建造过程中对箱变选型时,应考虑到电网故障导致高电压时铁芯易饱和,对电站高电压穿越性能产生不利影响,变压器性能应充分考虑这一点,避免1.3倍过电压时变压器磁饱和导致有功功率跌落较大,甚至是变压器过热而导致损。

参考文献

[1] 梁作.“双碳”目标下光伏产业发展的新机遇与新应用[J]. 广东经济,2023(17):74-77.
[2] 赵富山.“双碳”目标下我国光伏产业高质量发展的难点与对策[J]. 科学与信息化,2023(6):129-131.
[3] 刘建伟. 新能源光伏发电技术应用的思考[J]. 内蒙古煤炭经济,2021(15):185-186.
[4] 陈金波,薛峰. 分布式并网光伏电站系统应用与技术分析[J]. 科技创新与应用,2019(20):148-149.
[5] 唐志超,李祖有,王周毅. 光伏发电技术的应用研究[J]. 光源与照明,2024(2):132-134.
[6] 廖巧玲. 光伏电站并网对电网稳定性的影响[J]. 电力设备管理,2024(15):96-98.
[7] 杨海波. 大型光伏电站并网运行控制技术及对电网影响研究[D]. 西安:西安理工大学,2016.
[8] 汪泽,李春兰,王长云,等. 大规模光伏电站接入电网对配电网稳定性影响研究[J]. 能源研究与管理,2016(4):50-54.
WANG Ze, LI Chunlan, WANG Changyun, et al. Research of the large photovoltaic power station access influence on the stability of distribution network[J]. Energy Research and Management, 2016(4): 50-54.
[9] 寇薇. 并网光伏发电故障穿越稳定性研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
[10] 苏立,毛成,文贤旭,等. 变速水力发电机组低电压穿越中机组转速上升率的计算及其影响分析[J]. 电网与清洁能源,2024,40(2):149-154.

- SU Li, MAO Cheng, WEN Xiankui, et al. Calculation and impact analysis of unit speed rise rate in low voltage through of variable speed hydropower turbine units [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(2): 149-154.
- [11] 黄肖琪, 周羽生, 周文晴, 等. 基于储能和无功优化的直驱机组海上风电场低电压穿越策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 57-64.
- HUANG Xiaoqi, ZHOU Yusheng, ZHOU Wenqing, et al. Low voltage ride through strategy of the D-PMSG offshore wind power farm based on energy storage and reactive power optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 57-64.
- [12] 肖立军, 黄辉, 贺曼, 等. 一种新能源经柔直并网的故障穿越策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(5): 117-124.
- XIAO Lijun, HUANG Hui, HE Man, et al. Research on fault ride-through strategy of new energy through flexible direct current grid connection[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(5): 117-124.
- [13] 徐碧川, 潘卓洪, 童涛, 等. 跨网入侵直流偏磁风险的分析与治理[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 84-92.
- XU Bichuan, PAN Zhuohong, TONG Tao, et al. Analysis and mitigation of cross-grid DC bias problem[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 84-92.
- [14] 王泽青, 夏成军, 赖胜杰, 等. 混合型MMC非闭锁型直流故障穿越的故障等效模型[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 103-111.
- WANG Zeqing, XIA Chengjun, LAI Shengjie, et al. Fault equivalent model for non-blocking DC fault ride-through of hybrid MMC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 103-111.
- [15] 王瑞, 商飞, 王良全. 基于LabVIEW的光伏逆变器低电压穿越检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(3): 178-184.
- WANG Rui, SHANG Fei, WANG Liangquan. Research on low voltage ride through detection method of photovoltaic inverter based on LabVIEW[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(3): 178-184.
- [16] 孙文辉, 潘明, 徐梦潇, 等. 光伏接入条件下影响OLTC“负调压效应”临界点因素的研究[J]. 变压器, 2024, 61(1): 40-46.
- SUN Wenhui, PAN Ming, XU Mengxiao, et al. Research on critical point factors of OLTC negative voltage regulation effect under photovoltaic access condition[J]. Transformer, 2024, 61(1): 40-46.
- [17] 刘俊, 朱方涛. 变电站光伏发电功率稳定性控制方法研究[J]. 通信电源技术, 2023, 40(24): 232-234.
- LIU Jun, ZHU Fangtao. Research on power stability control method of photovoltaic power generation in substation[J]. Telecom Power Technologies, 2023, 40(24): 232-234.
- [18] 樊世超, 赵丹. 光伏电站高电压穿越研究综述[J]. 科技创新与应用, 2017(27): 180-181.
- [19] 雷国斌, 方侃, 王生渊, 等. 光伏电站低电压穿越试验分析[J]. 青海电力, 2014, 33(1): 5-7.
- LEI Guobin, FANG Kan, WANG Shengyuan, et al. Analysis on low voltage ride through test of photovoltaic generation station[J]. Qinghai Electric Power, 2014, 33(1): 5-7.
- [20] 朱宏毅, 沈渭程, 董开松, 等. 风电机组高电压穿越技术研究及现场实测[J]. 电气技术, 2020, 21(11): 46-49.
- ZHU Hongyi, SHEN Weicheng, DONG Kaisong, et al. Research on high voltage crossing technology of wind turbine and field measurement[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(11): 46-49.
- [21] 郑重, 耿华, 杨耕. 新能源发电系统并网逆变器的高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015(6): 1463-1472.
- ZHENG Zhong, GENG Hua, YANG Geng. High voltage ride-through control strategy of grid-connected inverter for renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015(6): 1463-1472.
- [22] 叶盛峰, 王维庆, 王海云. 基于STATCOM风电机组高电压穿越技术[J]. 高压电器, 2017, 53(5): 35-40.
- YE Shengfeng, WANG Weiqing, WANG Haiyun. High voltage ride-through technology of wind generators based on STATCOM[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(5): 35-40.
- [23] 张文, 孙海琦, 张荣, 等. 光伏电站高电压穿越能力测试分析[J]. 宁夏电力, 2023(2): 41-45.
- ZHANG Wen, SUN Haiqi, ZHANG Rong, et al. Test analysis on high voltage ride through capability in photovoltaic power station[J]. Ningxia Electric Power, 2023(2): 41-45.
- [24] 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2024 [S]. 2024.
- Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system: GB/T 19964—2024 [S]. 2024.
- [25] 光伏发电并网逆变器技术要求: GB/T 37408—2019 [S]. 2019.
- Technical requirements for photovoltaic grid-connected inverter: GB/T 37408—2019 [S]. 2019.

作者简介:

王智高(1988—), 男, 工程师, 从事新能源检测研究工作。

王弋飞(1981—), 男, 高级工程师, 从事新能源检测研究工作。

范伟强(1986—), 男, 高级工程师, 从事新能源检测研究工作。

韩辰光(1985—), 男, 高级工程师, 从事新能源检测研究工作。