

光伏并网逆变器低电压穿越检测方案分析

王定国¹, 陈卓², 姚为正¹, 刘刚¹

(1. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 许昌开普检测技术有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 通过对基于阻抗分压式和电网模拟式两种光伏并网逆变器低电压穿越 LVRT 检测方案分析及试验对比, 阐明了两者在主电路拓扑、电压跌落幅值范围、准确性、瞬时过载能力和控制稳定性等方面的差异性。分析与试验结果表明, 基于阻抗分压式的光伏并网逆变器 LVRT 检测方案能够真实地满足 LVRT 测试要求, 并且输出电压波形稳定, 更接近实际工况。

关键词: 光伏逆变器; 低电压穿越; 电压跌落发生器; 阻抗分压; 电网模拟器

Analysis of grid-connected PV inverter low voltage ride through testing scheme

WANG Ding-guo¹, CHEN Zhuo², YAO Wei-zheng¹, LIU Gang¹

(1. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 2. Xuchang Ketop Testing Technology Co. Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: By analyzing and comparative test for LVRT test schemes based on passive-impedance network and the grid simulator, this paper deals with the diversity in terms of the main circuit topology, voltage dip range and accuracy, instantaneous overload ability and control stability etc. The analysis and testing results show that LVRT testing scheme based on the passive-impedance network can be very closer to the actual operation condition with stable output voltage waveforms.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050206).

Key words: photovoltaic inverter; LVRT; VSG; passive-impedance network; grid simulator

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)12-0143-05

0 引言

低电压穿越能力 (Low Voltage Ride Through Capability), 最早是对风力发电系统提出的要求, 是指风力发电机的端电压降低到一定值的情况下不脱离电网而继续维持运行, 甚至还可为系统提供一定无功以帮助系统恢复电压的能力。具有低电压穿越能力的风力发电机在电网出现故障或扰动而引起风电场并网点电压在一定的跌落范围内时, 可躲过电网保护动作时间, 电网故障切除后可恢复正常运行, 这不仅可以避免风电机组大规模脱网, 还可以减少风电机组在故障时反复并网而导致对电网的频繁冲击。

随着新能源并网发电的不断发展, 太阳能光伏发电系统在电网中所占比重越来越大, 国家能源局的 2014 年光伏发电新增目标就达 14 GW, 光伏发电系统与风力发电系统一样, 如果光伏电站还采取被动保护解列方式, 不具备低电压穿越能力, 不仅

会导致有功出力突然大量减少, 增加整个系统的恢复难度, 还可能加剧故障, 导致大规模停电, 因此光伏发电系统的低压穿越能力显得尤为重要, 而光伏发电系统主要由光伏并网逆变器并网, 因此光伏并网逆变器具有低电压穿越的能力并通过认证测试就成为其被允许接入电网的首要条件。

目前, 相关单位对发电系统自身设备的低电压穿越能力的研究与试验比较深入^[1-3], 且相关技术都基本掌握, 但对光伏并网低电压穿越检测方案的分析研究则较少^[4]。

本文对基于阻抗分压式和电力电子可编程电网模拟式 (以下简称“电网模拟器”) 两种光伏并网低电压穿越检测方案进行了深入的对比分析, 分析了两种方案的优缺点, 说明了基于阻抗分压光伏并网低电压穿越检测方案更接近实际工况。

1 低压穿越能力要求

国家标准《GB/T 19964-2012 光伏电站接入电力系统技术规定》^[5]的“8 低压穿越”规定如下:

A) 基本要求

基金项目: 国家高技术研究发展 863 计划课题 (2012AA050206)

光伏电站并网点电压跌至 0 时,光伏电站应能不脱网连续运行 0.15 s,光伏电站并网点电压跌至曲线 1 以下时,光伏电站可以从电网切出。

B) 故障类型

电力系统发生三相短路故障、两相短路故障和单相接地短路故障时,若光伏电站并网点考核电压全部在图 1 中电压轮廓线及以上区域内,光伏电站应保证不脱网连续运行。

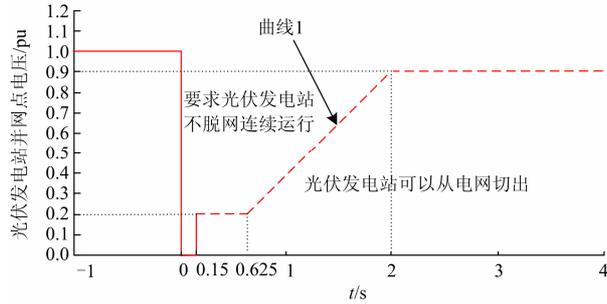


图 1 光伏电站低电压穿越能力要求

Fig. 1 Requirement of PV station LVRT ability

C) 有功功率恢复

对电力系统故障期间没有脱网的光伏电站,其有功功率在故障清除后应快速恢复,自故障清除时刻开始,以至少 30%额定功率/秒的功率变化率恢复至故障前的值。

D) 动态无功支撑能力

自并网点电压跌落的时刻起,动态无功电流的响应时间不大于 30 ms,自动态无功电流响应起直到电压恢复至 0.9 pu 期间,光伏电站注入电力系统的无功电流 I_T 应实时跟踪并网点电压变化。

关于光伏并网低电压穿越检测方案的要求,国家能源局行业标准《NB/T 32005-2013 光伏电站低电压穿越检测技术规程》^[6]的“6.1 电压跌落发生装置基本要求”中要求 LVRT 跌落装置宜使用无源电抗器模拟电网电压跌落。

以上标准要求光伏电站应具备三相短路故障、两相短路故障和单相接地短路故障穿越能力,且还需提供相应的动态无功支撑, LVRT 跌落装置推荐使用无源电抗器来模拟电网电压跌落的方式,但现有些检测机构或单位采用电网模拟器的 LVRT 检测方案,则主要是因为受制于无 10 kV 电网专线或建设资金的限制。

2 低电压穿越检测方案对比

典型的光伏电站拓扑是光伏并网逆变器输出加升压变压器将电压升至 10 kV, 10 kV 为光伏电站能量汇入电网,图 2 所示为光伏电站故障原理

框图,对光伏电站低电压穿越能力要求,则是指 10 kV 母线出现短路或接地故障时,光伏电站应具备故障穿越的能力。

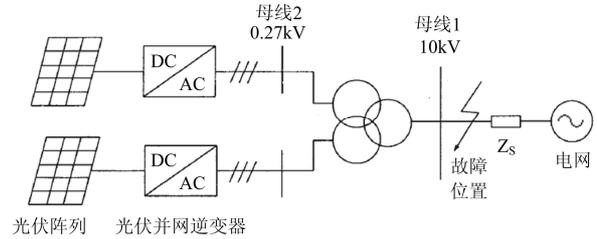


图 2 电网故障原理框图

Fig. 2 Grid fault schematic diagram

光伏发电系统低电压穿越检测方案的核心是采用什么设备作为低电压跌落发生器 (voltage sag generator, VSG), 一般有三种实现方式, 第一是采用变压器方式, 通过变压器副边设置不同的抽头来实现输出电压的跌落, 该种方式因变压器体积和重量较大, 输出切换也较难, 因此实际应用中采用该种方案的较少; 第二是采用阻抗分压方式; 第三是采用电网模拟器。后两种实现方式都有相关检测机构或光伏并网逆变器生产企业采用, 以下则对两种方案进行对比分析。

2.1 主电路拓扑

图 3 所示, 阻抗分压检测方案是指采用限流电抗 X1 和短路电抗 X2 构成的阻抗分压电路为核心, 该检测方案是在变压器 T1 的 10 kV 母线输入串联阻抗分压网络, 电路简单, 实现方便, 能很好地模拟图 2 所示的电网故障点电压跌落。

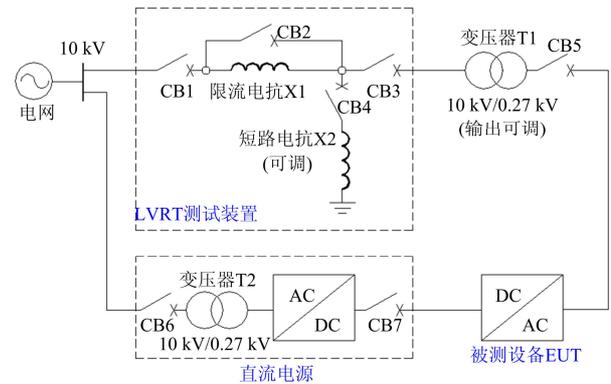


图 3 阻抗分压低电压发生器

Fig. 3 VSG with passive-impedance network

图 4 所示, 电网模拟器检测方案是采用基于电网模拟器为核心构成的低电压发生器, 该方案拓扑与图 3 所示阻抗分压方案不同之处是其采用电网模拟源代替阻抗分压来实现电网电压的跌落, 由于成

本原因, 现采用的电网模拟器多串联在变压器 T1 的低压侧, 而非 10 kV 侧, 采用低压电网模拟器, 一般是在三相 UPS 基础上改造而成, 为进一步节省成本, 有些厂家取消了直流电源, 将图 4 的 A 和 B 短接, 构成图 5 所示的简化低电压穿越检测方案, 该方案虽然可以实现被测光伏设备 EUT 并网点的电压跌落, 但从主电路拓扑看, 其系统的阻抗网络与图 2 所示实际系统较大的差别。

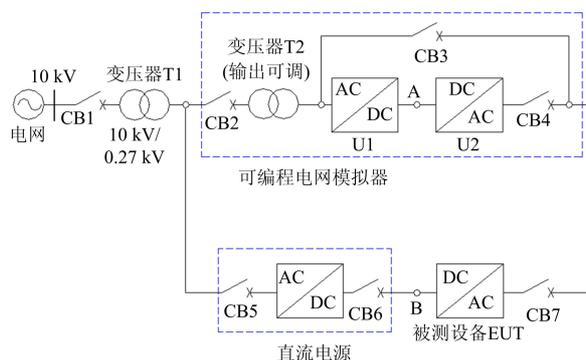


图 4 基于电网模拟器低电压发生器

Fig. 4 VSG with grid simulator

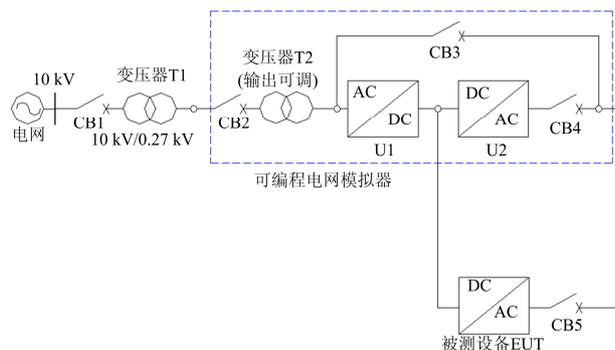


图 5 基于电网模拟器的简化低电压发生器

Fig. 5 Simplified VSG with grid simulator

2.2 电压跌落幅值准确性

为验证太阳能光伏并网系统在不同电网电压跌落值都具备低电压穿越能力, 检测试验一般需进行 0%, 20%, 40% 等各电网电压跌落点的测试。基于阻抗分压测试方案由于采用的是可调电抗器分压原理, 电抗器只能按设计步长进行调节, 不能平滑的进行连续调节, 受电缆和变压器阻抗, 以及电抗器精度的影响, 该种方案的电压跌落幅值难以有效的控制, 也不能随意更改。而基于电网模拟器的测试方案, 因其输出电压采用 PWM 闭环调节输出, 可以很好的解决此问题, 使电压跌落幅值控制在一定范围之内。

但从验证太阳能光伏并网系统低电压穿越能力

来说, 电压跌落幅值是否准确, 并不影响对被测设备能力的检测, 因为不同深度的电压跌落是我们人为选择的测试点, 并不是实际电网只存在这几个点的跌落, 其目的是要进行全电压跌落范围的测试, 但又无法做到全部范围内点的测试, 只能人为的选择几个电压跌落测试点, 为了使测试的统一性, 标准规定了其电压跌落幅值的精度, 但从验证低电压穿越能力的有效性来说, 30% 电压跌落还是 29% 电压跌落, 都可以达到相应的检测目的, 因此标准 NB/T 32005-2013 只规定了 $0\%U_n$ 和 $20\%U_n$ 两个点的电压跌落幅值容差为 +5%, 其它各点满足一定的电压跌落范围就可以。

2.3 电压跌落幅值范围

由于基于电网模拟器采用半导体作为开关器件, 不管是 IGBT 还是 IGCT 等, 其器件都存在一定的压降和阻抗、也受最小脉宽和最小调制度的限制、死区的影响, 以及输出滤波器阻抗的影响, 电网模拟器是不能全电压范围输出, 特别是低于 30 V 以下的低电压输出时, 电压波形畸变严重, 也无法模拟出真正的“0 电压”, 其输出“0 电压”一般采用封锁开关器件脉冲或者将输出短路来实现, 前者封锁脉冲后, 输出还有残压, 且不是真正意义的输出为 0, 被测光伏逆变器往系统输入无功时, 还会抬高该点电压, 后者采用输出短路方式, 则因在低压侧且靠近被测光伏逆变器, 容易导致光伏逆变器输出短路而保护动作, 因此, 不管采用哪种方式, 其电压的跌落和恢复与实际光伏发电系统的工况有很大差别。

而基于阻抗分压测试方案, 由于是在实际电网中用断路器直接进行短接来实现电压的跌落控制, 因此进行零电压穿越时不仅不会出现残余电压, 而且更能够真实模拟光伏发电现场 10 kV 母线电压跌落和恢复的实际运行工况。

2.4 瞬时过载耐受能力

图 6 为电网模拟器输出可调电压源的 DC/AC 单元 (图 4 中的 U2) 原理框图, 其采用三相全桥或图 6 所示 3 个单相全桥构成, 其输出 PWM 波形经过 LC 滤波器后, 输出设定电压, 后级也可以加一级变压器隔离, 由于电网模拟器采用 IGBT 或 IGCT 等半导体作为开关器件, 其瞬时耐受电流和耐受时间均有很大的限制, 半导体的短路电流耐受值都是微秒级, 一般都在 $10 \mu\text{s}$ 之内, 因此电网模拟器有一个技术指标“波峰因数”, 其值一般为 3, 也就是电网模拟器输出电流的峰值最大只能为额定输出电流的 3 倍, 超过该值, 电网模拟器则会保护或封锁 IGBT 脉冲限流, 而在电网模拟器做“0 电压”跌落或短路故障试

验时将要耐受很大的冲击电流，在电压动态恢复过程中，由于电网模拟器输出滤波电容和被测光伏并网逆变器输出滤波电容无软启过程，电压瞬时增加，也将产生很大的冲击电流，加上输出纹波电流，易导致电网模拟器过流保护动作，因此电网模拟器的容量选择至少应选择大于被测设备容量的3倍以上，部分电网模拟器厂家采用输出限流方式来解决过流故障，这必然会引起输出电压变化，与实际工况差异较大。

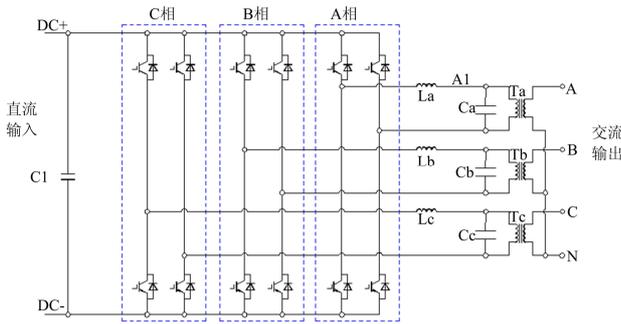


图 6 电网模拟器原理框图

Fig. 6 Schematic diagram of grid simulator

而基于阻抗分压测试方案，采用电抗器限流和分压，其瞬时能耐受 5 倍以上的冲击电流，且耐受时间远大于微秒级，该测试方案更安全可靠。

2.5 控制稳定性

基于阻抗分压测试方案，其控制主要是逻辑控制，也就是按照时序要求对开关进行控制，控制较简单，系统的稳定性较强。

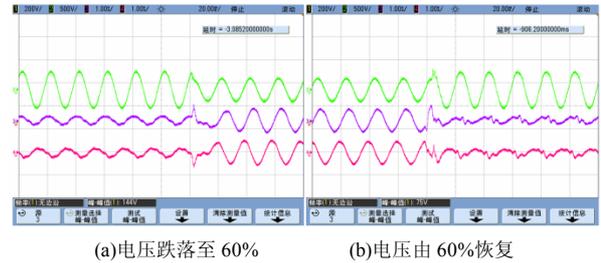
而电网模拟器的控制则比较复杂，不仅要考虑输出电压的稳定性和波形质量，而且也要考虑输出电压跌落和恢复的快速响应特性，前者需要控制参数尽可能小，以减小超调量，后者则要求控制参数尽可能大，增加控制前馈，以实现输出电压的快速跌落和上升，但这势必会导致电压的超调，导致输出短时欠压或过压。

另一方面，电网模拟器和被测光伏逆变器输出联接在一起，各自开关频率不同，滤波参数不同，还存在相互耦合，互相干扰的风险，在进行光伏并网逆变器低电压穿越测试过程中，一般需测试系统带被测光伏逆变器运行一段时间，热稳定运行后再进行测试，这不仅是对被测设备的考验，也是对电网模拟器的考验，因此由电网模拟器构成的低电压穿越检测方案的可靠稳定性是不可忽视的问题。

3 测试分析

本文对基于阻抗分压的 LVRT 检测方案和基于

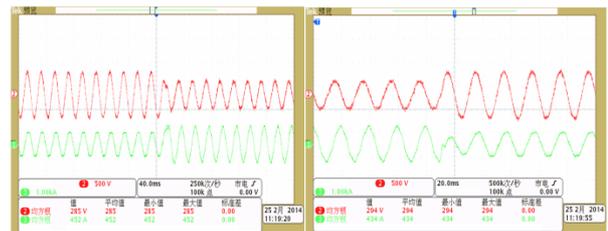
电网模拟器的 LVRT 检测方案进行测试对比，被测设备均采用 500 kW 光伏并网逆变器，阻抗分压 LVRT 检测设备容量为 1 MW，电网模拟器容量为 2 MW，测试波形见图 7、图 8 所示，试验波形为 500 kW 光伏并网逆变器交流输出端口的电压和电流波形，在电网电压跌落期间，逆变器均由跌落前的纯有功逆变状态转为纯无功支撑模式，当电网电压恢复后，逆变器瞬间切回纯有功逆变模式。



(a)电压跌落至 60% (b)电压由 60%恢复

CH2: U_a (500 V/div); CH3: I_a (1 kA/div); CH4: I_b (1 kA/div)

图 7 基于阻抗分压低电压穿越测试波形
Fig. 7 LVRT testing waveforms based on passive-impedance network



(a)电压跌落至 60% (b)电压由 60%恢复

CH2: U_a (500 V/div); CH3: I_a (1 kA/div)

图 8 基于电网模拟器低电压穿越测试波形

Fig. 8 LVRT testing waveforms based on grid simulator

测试波形显示，采用大容量电网模拟器的 LVRT 检测方案，通过稳压闭环控制，动态调节输出电压，可使输出跌落电压趋于理想，未把实际电网的自阻抗考虑在内，也无法模拟出电压跌落抖动的暂态过程，而采用阻抗分压式 LVRT 检测方案，采用在 10 kV 高压侧跌落，更加贴近地模拟了实际电网电压跌落，该方案 LVRT 测试可以验证光伏并网逆变器在电网电压突变以及弱电网下是否满足稳定性控制要求。

4 结论

本文通过对基于阻抗分压式和电网模拟式的光伏并网逆变器低电压穿越检测方案在主电路拓扑、电压跌落幅值范围、准确性、瞬时过载能力和控制稳定性等方面进行了分析对比，并进行了试验验证，试验结果表明，基于阻抗分压的光伏并网逆

变器低电压穿越检测方案能较好的满足 LVRT 测试要求, 且输出波形稳定, 更接近实际工况, 这就是标准《NB/T 32005-2013》强调 LVRT 跌落装置需使用无源电抗器模拟电网电压跌落的原因, 本文为光伏并网逆变器 LVRT 检测平台的建设, 提供了一个很好的参考。

参考文献

- [1] 陈波, 朱晓东, 朱凌志, 等. 光伏电站低电压穿越时的无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 6-12.
CHEN Bo, ZHU Xiao-dong, ZHU Ling-zhi, et al. Strategy for reactive control in low voltage ride through of photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 6-12.
- [2] 梁海峰, 冯燕闯, 刘子兴, 等. 到基于无差拍控制的光伏电站低电压穿越技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 110-115.
LIANG Hai-feng, FENG Yan-chuang, LIU Zi-xing, et al. Research on low voltage ride through of photovoltaic plant based on deadbeat control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 110-115.
- [3] 王定国, 张红超. 双馈型风力发电机低电压穿越的分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 70-73.
WANG Ding-guo, ZHANG Hong-chao. Analysis and research of low voltage ride through for doubly fed wind power generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 70-73
- [4] 徐亮辉, 陈志磊, 夏烈, 等. 无源低电压穿越检测方案分析[J]. 电力电子技术, 2012, 46(6): 4-6.
XU Liang-hui, CHEN Zhi-lei, XIA Lie, et al. Analysis of passive low voltage ride through testing scheme[J]. Power Electronics, 2012, 46(6): 4-6.
- [5] GB/T 19964-2012 光伏电站接入电力系统技术规定[S].
GB/T 19964-2012 technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system[S].
- [6] NB/T 32005-2013 光伏电站低电压穿越检测技术规范[S].
NB/T 32005-2013 testing code for low voltage ride through of photovoltaic power station[S].

收稿日期: 2013-11-06

作者简介:

王定国(1962-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统产品研究及科研管理; E-mail: dingguow@xjgc.com

陈卓(1978-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事新能源光伏发电系统及设备的试验与研究; E-mail: chenzhuo@ketop.cn

姚为正(1967-), 男, 博士后, 教授级高级工程师, 享受国家政府津贴专家, 主要从事高压直流输电换流阀技术、交流柔性输电技术(FACTS)、风力发电并网变流技术、电能质量防治技术的研究; E-mail: weizhengy@xjgc.com

刘刚(1973-), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力电子变流技术研究与应用; E-mail: gangl@xjgc.com