

并网光伏电站低电压穿越检测装置的开发

最新的国家标准规定大型光伏电站应满足低电压穿越(LVRT)的要求。提出了适用于高海拔地区的并网光伏电站LVRT检测装置开发方案,并对检测装置的拓扑结构和试验方法进行了论述。检测装置采用了阻抗分压式的结构,全自动化设计,无须人工进行电抗器接线,能够实现不同电压等级(35 kV和10 kV)的三相对称跌落试验、两相相间不对称跌落试验和单相接地不对称跌落试验。装置采用移动车载的形式,全部设备集成在封闭的集装箱体内,适合西北高海拔地区开展光伏并网测试工作,确保光伏电站并网质量,保障电网安全稳定运行。

华光辉¹ 王德顺¹ 李春来² 俞 斌¹ 孔爱良¹ / 1.中国电力科学研究院
2.国网青海省电力公司电力科学研究院

0 引言

光伏发电具有波动性、随机性及间歇性的特点,光伏电站易产生谐波、电压变动等电能质量问题,威胁电网安全运行^[1]。对于大规模集中并网的光伏系统,如果电网发生故障导致电压跌落时,若光伏电站简单采取被动保护式解列则会导致有功出力大量减少,增加整个系统的恢复难度,甚至可能加剧故障,引起其他机组的解列,导致大规模的停电。因此,并网光伏系统必须具备低电压穿越(LVRT)的能力^[2]。

并网光伏电站LVRT是指在电力系统事故或扰动引起光伏发电站并网点电压跌落时,在一定的电压跌落范围和时间间隔内,光伏发电站依然能够保持不脱网连续运行,甚至能根据电网的需求为其提供一定的无功功率,以支持电网故障恢复直到电压达到正常水平,从而穿越低电压这个区域^[3]。

面对我国西北高海拔地区规模化光伏发电迅猛增长的态势,为了解决其光伏发电规模化接入的技术难题,提升光伏发电系统设计水平,亟需开展面向高海拔、大容量移动式光伏并网试验检测技术研究及检测装置的研发,在现场对包含零电压穿越的光伏电站LVRT能力进行检测,以促进我国光伏发电行业的健康快速发展。

1 LVRT检测装置开发方案

1.1 光伏电站LVRT能力要求

国标GB/T 19964—2012《光伏电站接入电力系统技术规定》规定我国光伏电站LVRT能力要求如图1所示^[4]。

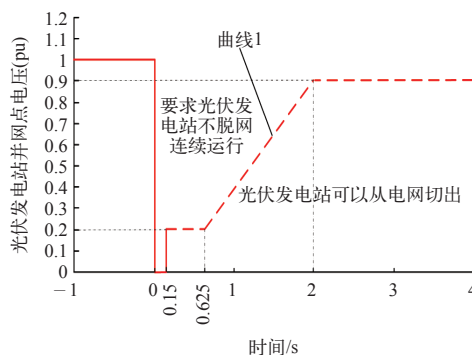


图1 我国光伏并网发电的低电压穿越技术要求

规定要求,光伏电站并网点电压跌至0时,光伏发电站应能不脱网连续运行150 ms,光伏并网点电压跌至曲线1以下时,即如图1所示的光伏发电站可以从电网切出区域时,才允许光伏电站脱网解列;而在曲线1以上区域时,光伏发电站应继续保持并网,等待电网恢复。



华光辉/高级工程师

关键词/Keywords

高海拔·
光伏电站·
低电压穿越·
并网测试·
阻抗分压·

1.2 LVRT检测装置电压跌落方式选择

目前主要有三类用于模拟电网电压跌落的拓扑结构：阻抗分压方式、变压器方式和电力电子变换方式^[5]。基于阻抗分压形式和变压器方式实现的检测装置属于无源电压跌落发生器，其中基于阻抗分压方式用电抗器对电网侧分压，通过调整电抗器参数来控制电压跌落深度，能逼真模拟电网故障现象，在实际工程中容易实施；变压器形式实现的电压跌落发生器，通过带中心抽头的变压器实现，但是变压器体积和重量很大，不便于运输，同时工艺比较复杂；基于电力电子变换形式实现的检测装置为有源电压跌落发生器，操作比较灵活，但是对于大功率光伏并网发电系统，

使用电力电子器件成本高，控制复杂，同时器件本身抵抗电网故障时电压、电流冲击能力有限。

结合这些因素最终确定为基于阻抗形式的LVRT检测装置拓扑结构。新颁布的能源行业标准NB/T 32005—2013《光伏电站低电压穿越检测技术规程》也推荐使用无源电抗器模拟电网电压跌落。

1.3 LVRT检测装置主回路结构形式

根据模拟实际故障要求，同时也为了光伏电站检测的方便，采用阻抗分压方式的主回路结构形式。图2为本文所提供的并网光伏电站LVRT检测装置的结构原理图，可满足35 kV和10 kV的电压等级的检测要求^[6-8]。

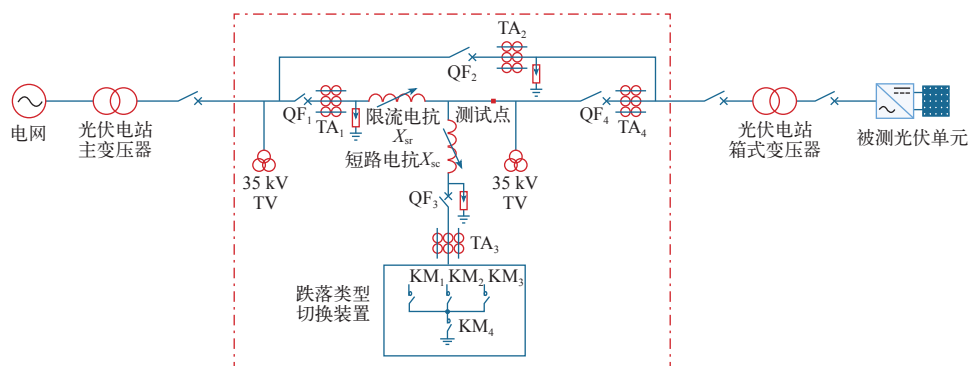


图2 LVRT检测装置结构原理图

该装置的主接线包括限流电抗器 X_{sr} 、短路电抗器 X_{sc} 、断路器 QF_n ($n=1、2、3$ 或 4)和跌落类型切换装置。检测系统工作在旁路状态时， QF_2 闭合， QF_1 、 QF_3 和 QF_4 断开，光伏单元正常发电；工作在试验状态时，合上 QF_1 和 QF_4 ，断开 QF_2 ，将限流电抗 X_{sr} 投入，然后按标准要求时间闭合 QF_3 ，将短路电抗 X_{sc} 投入，测试点的电压变为限流电抗与短路电抗的分压，模拟电压跌落，以此来检验被测光伏单元的LVRT特性。整个操作流程通过PLC实现自动控制。

装置电抗器组 X_{sr} 、 X_{sc} 设计为由多个可调电抗器组成，每个可调电抗器的参数可设计为相同或不同。根据电抗分压关系，可以得到检测系统输出电压（即电压跌落幅度）

$$U_o = \frac{X_{sc}}{X_s + X_{sr} + X_{sc}} U_n \quad (1)$$

式中， X_s 为电网电抗； U_n 为电网标称电压。

检测装置首先要保证检测的准确性，跌落幅度应覆盖 $0 \sim 90\% U_n$ 范围，而且每间隔 $5\% U_n$ 分布有一个跌落点。为此电抗器采用多抽头设置，通过连接电抗器的不同抽头来实现短路阻抗和限流阻抗的组合。检测装置电抗器 X_{sr} 设置4抽头，电抗器 X_{sc} 设置5抽头，如图3所示。通过组合式多选分接开关，使得两组电抗器各自投入 $0 \sim n$ ($n=1、2、3$ 或 4)抽头间的电抗值，合理设计各段电抗值，可以得到25个不同的电压跌落值比较均匀地分布在 $0 \sim 90\%$ 之间，以此保证跌落步长小于 $5\% U_n$ 。

电抗器设计时，任意一种组合都要保证测试点三相对称短路容量为被测光伏发电单元所配逆变器总额定功率的3倍以上，各电抗器电抗值与电阻值之比 (X/R) 应至少大于10。结合电压等级和实际电网电抗，可以合理选取电抗器 X_{sr} 和 X_{sc} 的电

抗值,当然其值并不唯一,只要满足分布要求和容量要求即可。为减少电抗器体积,本文选用的是铜导线空心浇注式电抗器。

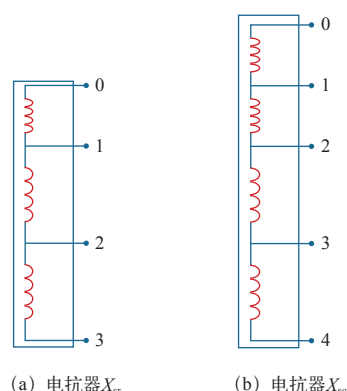


图3 多抽头电抗器

电抗器组各抽头感值匹配通过控制多选分接开关的档位来实现。组合式多选分接开关为无励磁分接开关的改进产品,从左到右分A、B和C三个可独立控制的调档部分,其中A、C各有四个档位,分别用于连接两组电抗器;B有两个档位,用于实现两组电抗器的对调。分接开关正视图和俯视图设计如图4所示。

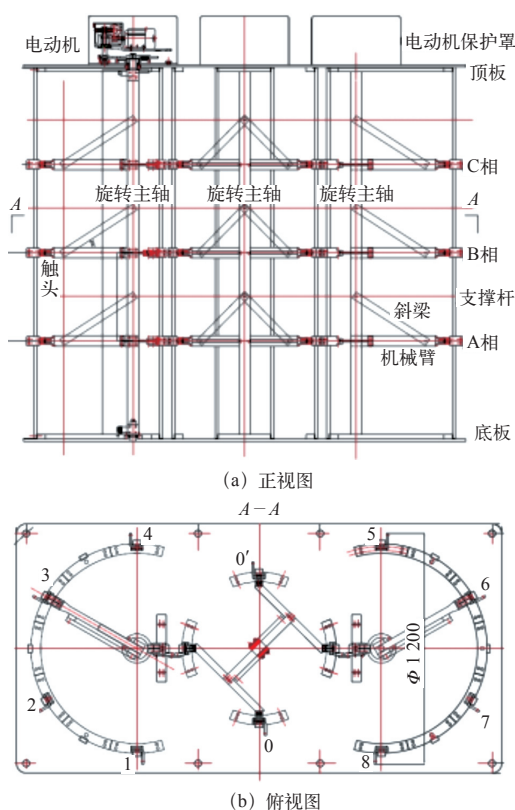


图4 多选分接开关设计图

跌落类型切换装置由四台单相接触器构成,实现三相对称短路、两相相间短路和单相对地短路等不同短路类型的切换。

电抗器、断路器、接触器、分接开关和控制系统等设备均放置在集装箱内,通过高压耐扭曲软电缆实现各设备之间的连接,便于检测设备的运输和在光伏电站内的检测试验。

2 检测装置的高海拔设计

2.1 高原气候条件对高压电气设备的影响

高原自然环境气候条件的特征主要表现在空气压力和密度较低、空气湿度较低、温度变化较大、绝对空气湿度较小以及太阳辐射较强等^[8]。

空气压力和密度降低对电气设备的空气绝缘强度和放电电压有较大影响。海拔增高,空气密度相对变小,带电质点平均自由行程增大,电子单位行程距离中的碰撞次数减少,但每次碰撞前积累的能量增大,空气分子电离的概率增大,故随着海拔的增高,空气绝缘强度降低,高压电气设备外绝缘的放电电压下降。空气压力和密度的降低,引起空气介质冷却效应的降低。对于以自然对流、强迫通风及空气散热为主要散热方式的高压电气设备,由于散热能力下降,温升高^[9]。

高原环境中平均空气温度和最高空气温度都随海拔升高而降低,对设备温升可以起到一定的补偿作用。较大的温度变化也会使设备的外壳容易变形和龟裂,密封结构易于破坏。空气绝对湿度也会随着海拔的升高而降低。绝对湿度降低时,绝对湿度在高原地区对外绝缘强度的影响不同于平原地区。

LVRT检测装置属于短时工作制,运行过程中温升问题并不严重,因此高海拔设计主要针对绝缘和耐压问题开展。

2.2 一次设备最小空气间隙

为保证高海拔地区一次设备的耐压安全,首先要让一次设备不同带电体之间留足绝缘距离,满足最小空气间隙。

设备应用在海拔3 500 m地区时, 35 kV电压等级电气一次设备要求的相间和相对地最小空气间隙为380 mm。产品结构设计时, 应保证最小电弧距离不小于此, 否则应采取措施进行绝缘包覆, 并最终耐压试验为绝缘强度考核依据^[10]。

2.3 操作过电压抑制

35 kV电抗器通过电缆与真空断路器连接, 理论分析及现场试验均表明, 由于截流、重燃和相间耦合等原因, 真空断路器在切断电抗器时, 会产生较高的操作过电压, 甚至有导致绝缘击穿的风险^[11-13]。

检测装置在集装箱内安装, 绝缘距离受限, 再加上运行在高海拔地区, 其操作过电压问题不容忽视, 必须在断路器QF₃和电抗器X_{sc}之间并联阻容吸收装置和避雷器, 降低过电压幅值和陡度, 对高频振荡进行阻尼, 能够有效吸收操作过电压, 保证设备运行安全。这里避雷器要选用组合式避雷器, 在相间和相对地之间同时起到过电压保护的作用, 作为阻容吸收装置的后备保护。阻容吸收装置参数可以通过PSCAD/EMTDC软件进行仿真合理选取^[14]。

2.4 外绝缘试验电压的高海拔修正

高海拔地区使用高压电气设备, 在海拔不超过1 000 m地区进行外绝缘耐受电压试验时, 应对试验电压按式(2)^[15-16]进行修正, 即

$$U = K_a U_0 \quad (2)$$

式中, U 为使用于高海拔地区的高压电气设备在海拔1 000 m以下地区试验时的耐受电压, kV; U_0 为高压电气设备的额定耐受电压, kV; K_a 为外绝缘强度的高海拔校正因数, 可由式(3)计算求得

$$K_a = e^{\frac{H-1000}{8150}} \quad (3)$$

式中, H 为设备使用地点海拔, m。

设备应用在海拔3 500 m地区时, 其一次设备在海拔不超过1 000 m地区的外绝缘耐受试验为工频140 kV, 雷电冲击290 kV。同时还需要各个一次设备供货商保证其设备内绝缘满足高海拔要求。

3 检测装置应用与现场试验

3.1 检测装置性能指标

根据我国电站建设特点, 设计检测装置的性能指标如下。

- 1) 测试容量: 2 MW。
- 2) 系统额定电压: 10/35 kV。
- 3) 适用海拔: 3 500 m以下。
- 4) 跌落幅度: 跌落幅度覆盖0~90% U_n 范围, 每间隔5% U_n 内分布有跌落点, 跌落对系统侧电压影响低于5% U_n 。
- 5) 跌落时间: 0~4 s, 可根据用户要求设定。
- 6) 跌落幅度切换方式: 远程自动控制切换。
- 7) 相对湿度: 10%~80%。
- 8) 过电流保护: 定值可灵活整定。

3.2 检测方法

3.2.1 检测准备

进行LVRT测试前, 光伏发电单元的逆变器应工作在与实际投入运行时一致的控制模式下。如图5所示, 连接光伏发电单元、LVRT检测装置以及其他相关设备。

检测应至少选取五个跌落点, 其中应包含零电压和20% U_n 跌落点, 其他各点应在(20%~50%) U_n 、(50%~75%) U_n 及(75%~90%) U_n 三个区间内均有分布, 并按照GB/T 19964—2012曲线要求选取跌落时间^[17]。

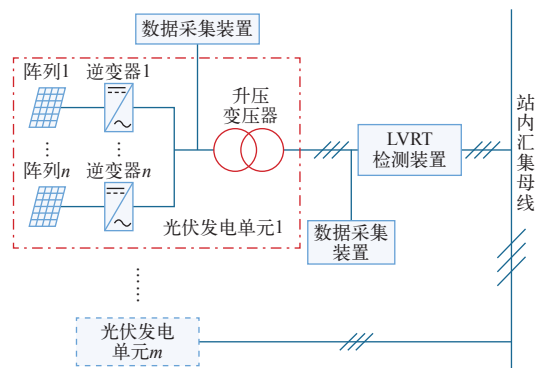


图5 LVRT能力检测示意图

3.2.2 空载测试

检测试验前, 应进行空载测试, 并应符合下

列要求。

- 1) 确定被测光伏发电单元逆变器处于停运状态。
- 2) 按照跌落深度要求调节分接开关,投入合适限流电抗和短路电抗,操作跌落类型切换装置内单相接触器,模拟电压三相对称跌落和不对称跌落。
- 3) 按流程操作断路器 $QF_1 \sim QF_4$ 模拟电网三相对称跌落和不对称跌落。
- 4) 测量并调整检测装置参数,使得测试点电压跌落幅值和跌落时间满足如图6所示的容差要求。

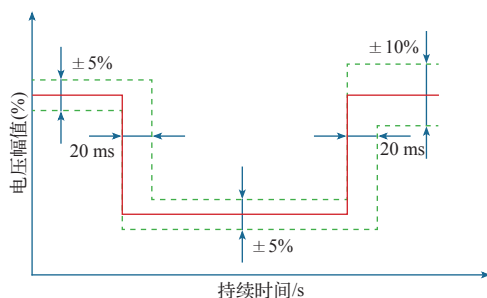


图6 电压跌落容差

3.2.3 负载测试

在空载测试结果满足要求的情况下,进行LVRT负载测试。负载测试时限流电抗及短路电抗配置应与空载测试保持一致,并应符合下列要求。

- 1) 将光伏发电单元通过检测装置接入电网投入运行。
- 2) 光伏发电单元应分别在 $0.1P_n \sim 0.3P_n$ 和不少于 $0.7P_n$ 两种工况下进行检测, P_n 为被测光伏发电单元所配逆变器总额定功率。

3) 按流程操作断路器 $QF_1 \sim QF_4$ 分别进行三相对称电压跌落和不对称电压跌落。

4) 在测试点通过数据采集装置记录被测光伏发电单元电压和电流的波形,记录应至少包含电压跌落前10 s到电压恢复正常后8 s之内的数据。

3.3 现场试验

2014年12月,研发的移动式并网光伏电站LVRT检测装备,在青海省共和县某海拔约3 000 m光伏电站开展了国内首次含有零电压穿越的光

伏电站LVRT现场检测试验,如图7所示。



图7 LVRT现场检测试验

光伏电站某单元发电系统通过LVRT检测装置接入电网后,进行LVRT检测的现场试验的一个录波波形如图8所示。



图8 现场试验波形

不同的光伏电站,其网架结构不尽相同,电网阻抗也各有不同,同样的一组电抗器接线形式在不同电站的跌落深度也不完全一样,试验证明其误差不会超过1%。从各个不同跌落深度的试验波形可看出该检测装置达到了预期跌落效果,可以模拟并网光伏电站的并网电压跌落。检测结果表明,系统达到了各项设计指标。

4 结束语

本文采用多抽头无源电抗分压方式,配合高压断路器、接触器以及组合式多选分接开关等设备,研发了一种适用于高海拔地区的并网光伏电站LVRT检测装置,能够在不同跌落深度下模拟对称和不对称电网故障。

系统配置了阻容吸收装置和组合式避雷器,能够有效吸收操作过电压,保证了设备运行的安全可靠。整个试验过程无须人工更改接线,增强了试验的安全性和可靠性,具有试验过程流程

化、数据处理智能化的特点,适合西北荒漠化/半荒漠化地区开展光伏电站并网测试工作,能够推动我国光伏产业的健康发展。

检测试验顺利开展,标志着我国在高海拔地区光伏电站LVRT现场检测能力实现重大提升,并填补该领域的国内外空白。

参考文献

- [1] 施佳锋,沈燕,程彩艳,等.光伏发电有功自动控制技术[J].宁夏电力,2012(1):1-4.
- [2] 甄晓亚,尹忠东,王云飞,等.太阳能发电低电压穿越技术综述[J].电网与清洁能源,2011,27(8):65-73.
- [3] Q/GDW 617—2011 光伏电站接入电网技术规定[S].北京:中国电力出版社,2011.
- [4] GB/T 19964—2012 光伏电站接入电力系统技术规定[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [5] 张兴,张龙云,杨淑英,等.风力发电低电压穿越技术综述[J].电力系统及其自动化学报,2008,20(2):1-8.
- [6] 宋海涛.低电压穿越(LVRT)测试装置的研制[D].北京:北京交通大学,2011.
- [7] 李红涛,张军军,包斯嘉,等.小型并网光伏电站移动测试平台设计与开发[J].电力系统自动化,2011,35(19):39-42.

- [8] GB/T 20635—2006 特殊环境条件高原用高压电气的技术要求[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [9] 许帆,徐冬.浅谈高海拔地区对电气设备的影响[J].江苏建材,2013(5):30-31.
- [10] 刘振亚.高海拔外绝缘配置技术规范[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [11] 杜宁,关永刚,张景升,等.40.5 kV真空断路器开断并联电抗器的现场试验[J].清华大学报:自然科学版,2010,50(4):517-520.
- [12] 谢天喜,周志成,陶风波,等.真空断路器开断并联电抗器保护措施仿真分析[J].中国电力,2014,47(1):39-43.
- [13] 王思华.真空断路器截流过电压的分析及其限制措施[J].电气开关,2006(2):9-11.
- [14] 吉亚民,周志成,马勇,等.真空断路器投切并联电抗器过电压故障分析[J].江苏电机工程,2014,33(2):10-15.
- [15] 王建生,杨小冬,钟连宏.关于高电压绝缘试验时的几个校正因数的探讨[J].高电压技术,2000(6):63-65.
- [16] 范立军.高海拔地区大气参数对电气设备外绝缘影响的研究[D].大连:大连理工大学,2002.
- [17] NB/T 32005—2013 光伏电站低电压穿越检测技术规程[S].北京:新华出版社,2013.

(收稿日期:2015-05-26) **EA**

(上接第19页)

断路器无法正常动作,从而导致电网事故的扩大.因此有必要对直流系统开关配置进行梳理,利用本文提到的措施,提高直流电源系统的可靠性。

参考文献

- [1] 白忠敏.现代电力工程直流系统[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [2] DL/T 5044—2014 电力工程直流系统设计技术规程[S].北京:中国电力出版社,2014.
- [3] 范瑞逢,邵卫祥.直流系统中空气断路器和熔断器级差配合试验研究简介[J].直流电源,2004(2).

- [4] 严浩军,范瑞逢.变电所直流电源系统存在的问题及其改进建议[J].浙江电力,2006(1).
- [5] 王鹏,韩京哲,刘润生,等.GM系列直流断路器级差配合试验分析[J].供用电,2003(2).
- [6] 彭向阳,陈献伟,潘龙.变电站直流系统常用断路器及熔断器动作特性分析[J].继电器,2006,34(23).
- [7] 项维,谢维兵.直流系统中馈电直流断路器的选用及安装[J].电工技术,2004(3).
- [8] 陈展尘.直流系统内熔断器与空气断路器配合的探讨[J].广东电力,2005,18(12).

(收稿日期:2015-06-04) **EA**