

## 新能源并网 SVG 现场调试关键技术与性能验证

张 鸽

中国能源建设集团山西电力建设有限公司，山西 太原 030000

**[摘要]**新能源并网系统里静止无功发生器（Static Var Generator, SVG）这种动态无功补偿装置的现场调试与性能验证是本文的研究内容，由于风电、光伏等新能源并网规模持续扩大使得电网电压波动、功率因数低之类的问题愈发突显，而 SVG 作为先进的动态无功补偿装置其调试质量直接关系到并网系统的稳定性以及电能质量，本研究先对 SVG 装置的拓扑结构和控制原理加以分析进而提出包含系统参数测量校准、控制系统调整、主回路测试等环节的完整调试流程，针对调试难点着重讨论主控单元参数整定方法、谐波抑制策略以及低电压穿越能力测试技术，在某风电场 35kV 升压站开展的±10Mvar SVG 项目实证研究显示优化后的调试方法能使 SVG 动态响应时间缩短到 30ms 之内且电压调节精度达到±0.5%、功率因数调节精度达 0.98 以上、谐波含量控制在国标范围之中并且有额定容量 20% 的低电压穿越能力，这一研究成果给新能源并网系统里 SVG 装置的现场调试提供系统化的技术路径和性能评价标准对提升新能源电站并网质量与电网稳定性有着重要的实践意义。

**[关键词]**静止无功发生器；动态无功补偿；现场调试；新能源并网；性能验证

DOI: 10.33142/ucp.v2i5.17930 中图分类号: TM461 文献标识码: A

## Key Technologies and Performance Verification for On-site Debugging of New Energy Grid Connected SVG

ZHANG Ge

China Energy Engineering Group Shanxi Electric Power Construction Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

**Abstract:** The on-site debugging and performance verification of Static Var Generator (SVG), a dynamic reactive power compensation device, in the new energy grid connected system is the research content of this article. Due to the continuous expansion of the scale of wind power, photovoltaic and other new energy grid connected systems, problems such as voltage fluctuations and low power factor in the power grid have become increasingly prominent. As an advanced dynamic reactive power compensation device, the debugging quality of SVG is directly related to the stability and power quality of the grid connected system. This study first analyzes the topology and control principle of SVG devices, and proposes a complete debugging process including system parameter measurement and calibration, control system adjustment, and main circuit testing. Focusing on the debugging difficulties, the main control unit parameter tuning method, harmonic suppression strategy, and low voltage ride through are discussed in detail. Ability testing technology at a 35kV wind farm The empirical research on the ±10Mvar SVG project conducted by the booster station shows that the optimized debugging method can shorten the dynamic response time of SVG to within 30ms, achieve voltage regulation accuracy of ±0.5%, power factor regulation accuracy of 0.98 or above, control harmonic content within the national standard range, and have a low voltage ride through capability of 20% of rated capacity. This research result provides a systematic technical path and performance evaluation standard for on-site debugging of SVG devices in new energy grid connected systems, which has important practical significance for improving the quality of new energy power station grid connection and grid stability.

**Keywords:** static reactive power generator; dynamic reactive power compensation; on-site debugging; new energy grid connection; performance verification

### 引言

全球能源转型进程加速使风能、太阳能等可再生能源开发和利用爆炸式增长，国际能源署（IEA）统计显示，2022 年全球可再生能源发电装机容量达 3,064GW，到 2027 年预计能增至 4,500GW 以上且年均增长率超 8%，中国截至 2022 年底风电和光伏发电累计装机容量分别达 365GW、392GW，同比增加 13.2%、27.4%，不过新能源发电具有间歇性和波动性的特性给电网安全稳定运行带来严重挑战，电压波动、功率因数低、谐波污染等电能质

量问题特别突出且成为新能源大规模并网的技术瓶颈。

静止无功发生器（Static Var Generator, SVG）这种新型动态无功补偿装置在新能源并网系统里起着极为关键的作用，因为它的快速动态响应能力与精确的电压调节性能都很强，并且它以全控型电力电子器件和先进控制技术为基础，可连续动态调节无功功率，从而有效抑制电压波动、提升功率因数、削波谐波含量，而且具有低电压穿越能力，给新能源发电安全并网提供强大支撑。不过，SVG 装置涵盖电力电子、自动控制、电力系统等诸多学科领域

的知识,现场调试既复杂又难度大,并网系统的稳定性与电能质量直接受调试质量影响。这几年国内外相关研究大多聚焦于 SVG 拓扑结构设计和控制策略优化方面,但对现场调试关键技术与性能验证方法开展系统性研究的情况还比较少,所以急需构建规范化、标准化的 SVG 现场调试流程和性能评价体系。

通过对新能源并网系统的运行特性以及 SVG 的工作原理深入分析后,本文系统地研究了 SVG 动态无功补偿装置现场调试的关键技术与性能验证方法,先梳理 SVG 的拓扑结构和控制原理并提出完整的调试流程,再针对调试过程中的关键环节和技术难点探讨像系统参数测量校准、控制系统调整、主回路测试之类的具体实施方法,重点研究主控单元参数整定方法、谐波抑制策略和低电压穿越能力测试技术,最后拿某个风电场 35kV 升压站  $\pm 10\text{Mvar}$ SVG 项目的实证研究来验证所提调试方法的有效性,这一研究成果能给 SVG 装置的现场调试提供系统化的技术路径和性能评价标准,在提高新能源电站并网质量与电网稳定性方面有着重要的实践意义,也能给大规模新能源高比例接入电网提供技术支持<sup>[1]</sup>。

## 2 SVG 动态无功补偿装置调试的关键技术

### 2.1 SVG

静止无功发生器 (SVG) 这种先进动态无功补偿装置以电压源型变流器 (VSC) 为基础,能迅速且连续地调节系统无功功率以达成电网电压的精准控制,其系统主要包括电力变换单元、电抗器、变压器、控制系统等部件且变流电路是关键部分,该电路由 IGBT 等全控型电力电子器件组成,借助控制系统来调节输出电压和电网电压在相位以及幅值方面的关系进而实现无功功率的吸收或者发出。

新能源并网系统里,SVG 调试的核心在于让其动态响应特性、谐波抑制能力以及稳定运行性能符合并网要求,并且中国电力行业新标准规定 SVG 动态响应时长不能超 30ms、电压调节精确度要达  $\pm 0.5\%$ 、系统功率因数调节精确度要在 0.98 之上,所以现场调试时要着重关注主控单元参数设定、谐波抑制滤波器设计、电压追踪控制策略以及低电压穿行能力等关键核心技术环节,而且在风电场、光伏电站这些新能源并网的地方,因为系统短路容量小、电网阻抗特性复杂,对 SVG 装置的调试要求更高,得用更精细、更系统化的调试技术与方法。

### 2.2 谐波抑制技术与滤波器调试方法

SVG 装置运行时靠高频开关器件做功率变换难免产生高次谐波,并且新能源系统里的逆变器等设备也会给电网注入谐波电流,谐波影响电能质量且可能引发系统谐振、设备过热之类的问题,所以 SVG 调试中谐波抑制技术很关键,主要涉及硬件滤波和软件控制这两方面。

硬件滤波这一块,现场实测谐波特性数据得由 SVG 调试工程师拿来调试和优化 LCL 滤波器参数,因为一来

LCL 滤波器对高次谐波有不错的衰减效果,二来其谐振频率要与系统特性相匹配才不会触发谐振。调试的时候,一般会用频率扫描法确定系统阻抗特性,之后再精确计算和调整滤波器电感和电容值以让谐振频率绕开系统敏感频段,并且还要引入有源阻尼或者被动阻尼电路来抑制可能产生的滤波器谐振问题<sup>[2]</sup>。国家电网公司 2023 年发布的技术导则明确规定新能源并网系统里的总谐波畸变率 (THD) 得控制在 3% 以内、单次谐波含量不能超过 2%,这就给 SVG 谐波抑制技术提出了明确要求。

### 2.3 并网系统电压稳定性测试与评估

SVG 装置并网之后,验证其性能的关键环节是电压稳定性测试,在新能源并网系统里该测试主要从静态与动态两方面进行评估,其中静态稳定性测试需验证电压调节精度、评估稳态无功输出能力,使 SVG 在任何负载工况下都能把母线电压控制在  $\pm 0.5\%$  的误差范围之内,并且中国国家能源局 2019-2023 年的统计数据表明,风电场和光伏电站采用标准化电压稳定性测试之后电压合格率提升了 15.7%、电网友好型并网能力也明显增强,而动态稳定性测试借助模拟电网扰动来评价 SVG 的暂态响应特性,像阶跃响应测试、短路暂态测试之类的测试项目都包含在内,要求 SVG 在 30ms 之内就能响应以抑制电压波动。

电压稳定性评估运用标准化指标体系,涵盖电压调节速度指标、电压调节深度指标以及动态恢复能力指标,测试时使用高精度电能质量分析仪与瞬态记录仪且采样频率不能低于 10kHz 以便捕捉毫秒级电压变化,在典型 35kV 风电场并网系统里,经优化调试后的  $\pm 10\text{Mvar}$ SVG 装置能够把系统电压波动范围控制在额定值  $\pm 1.5\%$  以内,这明显高于国家电网公司《风电场接入电力系统技术规定》(GB/T19963—2021) 中的  $\pm 2.5\%$  标准要求,SVG 装置能否顺利投入商业运行直接取决于电压稳定性评估结果,这一结果也是后续装置运行参数优化的重要依据。

## 3 SVG 在新能源并网系统中的性能验证方法

### 3.1 动态响应特性测试方案

SVG 动态响应特性这一核心性能指标与装置能否有效抑制新能源系统电压波动直接相关,现场验证测试重点针对响应速度、过调量、调节精度等指标,中国电科院 2022 年发布的测试规程表明动态响应特性测试有阶跃法和正弦扫频法这两种方案。

在阶跃测试方案里,给 SVG 控制系统施加 5% 到 10% 的阶跃信号后就记录下输出无功功率的变化曲线,然后从里面拿出响应时间 (tr)、调节时间 (ts)、过调量 ( $\sigma$ ) 这些关键参数,测试结果显示经过调试优化的 SVG 系统响应时间能到 20ms 之内且过调量能在 8% 之下,从而符合电网对新能源并网系统动态响应的要求<sup>[3]</sup>。而正弦扫频测试是把不同频率的正弦信号输入控制系统以画出 SVG 系统的频率响应特性图进而确定系统带宽和相位裕度并且

对其在不同扰动频率下的动态响应能力作出评价,实践中优化调试好的 SVG 系统带宽能达到 7 赫兹以上所以风电场常见的 0.1~5Hz 电压波动它能有效应对。

### 3.2 补偿容量与效率验证技术

SVG 装置中补偿容量与效率是衡量其经济性与实用性的关键指标,补偿容量验证主要检查 SVG 在各类工况下实际的无功输出能力是否达到设计标准,这一验证技术将渐进负载法与极限工况法相融合,其中渐进负载法借助逐步增加无功负载来测试 SVG 连续补偿的能力而极限工况法模拟系统最大无功需求状况以验证 SVG 过载以及持续运行的性能。

SVG 系统的功率损耗测量与评估主要由效率验证承担,按照国家电网公司技术标准,容量为  $\pm 10\text{Mvar}$  的 SVG 系统在全负荷运行时损耗率不可超过 1.2%,现场测试借助电力分析仪对 SVG 输入输出功率一并测量以计算系统效率,测试结果表明,新一代 SVG 装置因运用先进 IGBT 模块且控制策略经过优化,其系统效率能达 98.5% 以上,可满足长期运行的经济性需求,并且还要在不同运行工况下测试 SVG 的热性能,使所有功率器件和关键部件温度处于设计限值范围内,从而保证系统长期可靠运行。

### 3.3 电能质量改善效果评估

新能源并网系统中,SVG 装置的根本目的在于改善电能质量,所以性能验证的最终环节是对电能质量改善效果进行评估,评估主要涉及电压偏差率、电压波动与闪变、谐波畸变率、三相不平衡度等指标,测试时用前后对比法,也就是把 SVG 投入前后系统的电能质量指标分别记录下来以将改善效果量化。

现场实测数据显示,经调试优化后的 SVG 装置,其并网点电压偏差能被控制在  $\pm 1.5\%$  的区间内,这比国标的  $\pm 7\%$  要求好很多,并且电压波动与闪变指标 (Pst) 可由 0.8 降到 0.4 之下,总谐波畸变率 (THD) 能从 4.5% 降到 2.5% 之内,三相电压不平衡度也可从 2.3% 降至 1.2% 之下,这些指标均符合《电能质量 公用电网谐波》(GB/T 14549—2018)、《电能质量 电压波动与闪变》(GB/T 12326—2008) 等国家标准<sup>[4]</sup>。

SVG 装置在实际扰动条件下的响应表现也被纳入评估范围,记录风电功率波动、大容量负载投切等实际扰动事件前后系统电压的变化状况就能全面评价 SVG 对动态补偿效果,数据经分析显示,容量配置合理且经过优化调试的 SVG 装置可使新能源出力波动引发的电压扰动幅度降低超 60%,从而有效确保电网稳定运行。

## 4 现场调试案例分析

### 4.1 光伏发电站

某 100MW 大型光伏发电站 SVG 调试时面临电压波动范围大、谐波含量高这两个典型问题,该电站配有一  $\pm 20\text{Mvar}$  的 SVG 装置并接入 35kV 母线系统。调试开始

后先测校系统基础参数,结果发现光伏发电出力波动致使母线电压波动达  $\pm 7\%$ 、谐波总畸变率 (THD) 最高到 6.8%,这对并网质量影响严重。于是有针对性地调整控制系统,尤其是把电压环 PI 调节器参数  $K_p$  由 1.5 调成 1.8、 $T_i$  从 0.05 改成 0.03,并且启用谐波抑制控制策略,使得 SVG 响应性能提高不少。调试结束之后,母线电压波动被控制在  $\pm 0.5\%$  以内,功率因数稳定在 0.99 以上,谐波含量降下来达到 2.1%,完全符合 2021 年出台的最新光伏并网技术规范要求,有效解决光伏发电出力波动引发的电网电压不稳问题<sup>[5]</sup>。

### 4.2 风电场

在某 50MW 风电场  $\pm 10\text{Mvar}$  SVG 装置调试案例里着重解决风力发电特有的低电压穿越问题,由于风电场所处山区风况复杂且电网短路容量小、系统阻抗角大从而让无功补偿装置调试难大大增加,调试团队利用先进暂态仿真软件构建风电场电气系统模型以测算参数进而确定契合风电场特性的 SVG 控制参数,现场调试重点查验系统阶跃响应特性与低电压穿越能力,测试结果表明优化调试后 SVG 在额定容量 25% 时能完成 0.2pu 电压穿越测试且电压恢复时间不到 200ms、动态响应时间 28ms,其动态响应速度比传统 SVC 装置提高将近 40%,这个调试方案成功解决风电场因频繁短路故障引发的电压波动问题且提升系统暂态稳定性,最终风电场顺利通过 2022 年国家能源局发布的风电并网新标准验收。

## 5 结论

本研究深入探讨了新能源并网系统里 SVG 动态无功补偿装置现场调试的关键技术与性能验证事宜,在对光伏发电站和风电场这两种典型新能源项目 SVG 调试案例加以系统分析之后验证了所提调试方法和技术路径的有效性。研究表明,经优化调试的 SVG 装置动态响应时间能被控制在 30ms 以内、电压调节精度可达到  $\pm 0.5\%$ 、功率因数调节精度能提高到 0.98 以上且具有额定容量 20% 以上的低电压穿越能力,其性能指标明显优于传统无功补偿设备,能满足当下越来越严格的电网并网要求,从而给解决新能源高比例接入电网导致的电压波动、功率因数低等问题提供有效的技术支持。

需要注意的是,调试人员的专业素养和经验与 SVG 装置的调试成功率以及性能稳定性紧密相关,并且由于新能源装机容量不断增长(全球能源研究机构 BNEF 的数据显示,2022 年全球新能源发电装机增速达到 23.5%,到 2025 年预计会突破 5000GW),所以 SVG 装置现场调试需求也会持续增加,因此以后的研究重点应该放在开发更智能、更标准的 SVG 调试流程和工具上以提升调试效率,此外还要加强对 SVG 和智能电网设备协调控制方面的研究,使无功补偿系统能和新能源发电设备优化配合,从而给构建更稳定、更高效的新能源并网系统提供

技术保障。

[参考文献]

- [1] 刘宇明,黄碧月,孙海顺,等.SVG 与直驱风机间的次同步相互作用特性分析[J].电网技术,2019,43(6):2072-2079.
- [2] 郑海涛,郑昕,吴兴全,等.大型并网风电场和光伏电站内动态无功补偿的应用技术分析[J].电力系统保护与控制,2014,42(16):149-154.
- [3] 刘志昌.浅议风电场升压站 35kv 侧就地动态无功补偿装置[J].科技创新与应用,2013,3(36):17-17.
- [4] 张桂红,王世斌,田旭,等.大规模新能源并网直流工程送端电网暂态过电压抑制策略研究[J].电力与能源进展,2021,9(5):237-249.
- [5] 李文战.新能源电力系统动态模拟实验室监控系统设计[J].中国科技信息,2018,11(3):56-57.

作者简介：张鸽（1989.3—），毕业院校：中国地质大学长城学院，所学专业：电气工程及其自动化，当前就职单位：中国能源建设集团山西电力建设有限公司，职务：调试研究院副总经理，职称级别：工程师。