

110kV变电站接入大规模光伏电站后的电气暂态特性分析与协调控制策略

羊海山

齐丰科技股份有限公司 江苏 南京 210000

摘要：光伏电站规模日益扩大，并网后对电网电气暂态性能影响显著，本文以110千伏变电站整合大规模光伏电站为核心探讨内容，深入分析各类故障和运行状态下光伏电站与变电站相互作用机制，在此基础上创造性提出一系列协调控制方案以增强系统稳定性、可靠性和电能质量，经仿真测试与实际验证这些策略有效，为大规模光伏电站接入110千伏变电站提供理论基础和技术指导，还细致研究并网后系统电气瞬态响应如电压瞬变、频率瞬变等多方面，针对这些特性定制协调控制策略以提升系统整体稳定性和可靠性，经仿真分析严格校验这些策略有效性再次得到确认，为大规模光伏电站与110千伏变电站成功整合提供理论借鉴和技术范例。

关键词：110kV 变电站；大规模光伏电站；电气暂态特性；协调控制策略

引言：

全球能源结构深刻变革，太阳能作为清洁且取之不竭的可再生能源迎来前所未有的开发和广泛应用热潮，光伏电站大规模兴建蓬勃发展成为能源转型途中一道亮丽风景。这些大光伏电站和110千伏变电站并网时，光伏电站输出功率的不确定性和起伏性肯定会让电网电气暂态性能面临诸多严峻考验，像电压剧烈波动、频率明显偏移等现象常出现，电网安全可靠运行受到不小威胁，全面深入剖析110千伏变电站接纳大规模光伏电站并网后的电气暂态特性并提出科学有效的协调控制方案非常有现实意义且很迫切。

一、110kV 变电站接入大规模光伏电站系统概述

（一）系统结构

110千伏变电站与大规模光伏电站的并网系统架构通常很复杂，光伏电站汇聚众多光伏组件阵列，逆变器把直流电能巧妙转为交流电能后，再经升压变压器将电压逐步提至110千伏，接入110千伏变电站主母线，而110千伏变电站像座桥，一端连着光伏电站，另一端通过输电线路与上级电网和下级用电负荷衔接，织成复杂电力传输网络，各部分相互依存影响，系统中任何小环节变动都可能使电气暂态特性改变，光伏电站输出功率突然波动，这波动会经升压变压器传至110千伏变电站主母线，让其电压和电流波动，影响整个电网运行。

（二）光伏电站工作原理

丰富的太阳能被光伏电站巧妙地借助光伏效应转换成电能，光伏电池是其核心部件，阳光一洒落在这些电池上，电池内部半导体材质就与光子互动，产生一对对电子与空穴且在电池内建电场的驱动下，电子与空穴反向流动，电流就产生了。为满足多样化功率需求，多个光伏电池被精心串联或并联，组成庞大的光伏阵列，不过，光照强度、

温度等环境要素对光伏电站输出效能影响很大，光照强度的起伏在光伏电池输出电流的变化上直观体现且温度高低影响光伏电池的开路电压和短路电流，光伏电站输出效能随机波动特性很明显，这给电网稳定运作带来不小挑战。

（三）110kV 变电站在系统中的作用

在整个电力体系里，110千伏变电站是极为关键的节点，光伏电站输出的电能靠它汇聚和调配，它是上级电网和下级用电负荷间的桥梁，其能将光伏电站生成的电能升压后输送到上级电网，把电力资源送往更广阔的地方，并且能将上级电网的电能降压精准分配给下级负荷以满足当地用户用电需求，它还有电压调控、无功功率补偿等多种功能用来维持电网电压稳定，大型光伏电站并网后，110千伏变电站得有更强的适应能力，从而快速对光伏电站输出功率的波动作出响应，协调电网各环节运作，让整个系统安全平稳运行。

二、电气暂态特性分析

（一）光伏电站接入对电压的影响机制

大型光伏电站并入110千伏变电所时其输出电力波动会直接影响并网点电压水平，常规运作下光伏电站向电

网输送有功电能，若电网无功补偿机制不完善就可能让并网点电压升高，反之光伏电站输出电力下降，云层遮蔽使阳光强度减弱时并网点电压可能下降，并且光伏电站逆变器工作时消耗无功电能，若无功调控策略不合理也会给电压带来负面影响，逆变器大量消耗无功电能会使并网点无功功率缺口增大、电压下降趋势更显著，系统出故障或受干扰，如电网短路故障、负荷突变等都会引发电压暂态响应，以电网短路故障来说，短路瞬间故障点周围电压骤降，光伏电站受自身控制特性限制难以及时调整输出功率，这会致使并网点电压剧烈波动，在电压暂态过程中系统电容和电感元件存储与释放能量使电压振荡幅度进一步加大，电压波动若超出允许范围不但会干扰电网里其他设备稳定运行甚至可能造成设备损毁，电压暂态现象长短和恢复速率与系统各项参数关系紧密，像线路电阻抗大小、变压器变换比率等因素都很关键。

（二）频率暂态特性

传统电力网络架构下，电网频率稳定主要靠同步发电机的旋转速率，同步发电机借助调速装置能灵活调整输出功率从而把整个系统频率稳在恒定水平，但光伏电站是逆变技术电源形式，没有传统同步发电机的惯性调节和速度调控能力且其输出电力不受系统频率变化直接影响，大规模光伏电站并网运行后，电网功率短缺或过剩时，光伏电站不能像同步发电机那样自动调整输出稳定频率，电网频率调节能力被削弱，电力需求高峰时段，电网负荷突然增大，光伏电站输出若没及时响应，系统频率会快速下降，同样，电网突发扰动，像发电机故障跳闸或者大规模负荷投切时，系统有功功率失衡，频率瞬间波动，在这一频率瞬变过程中，系统里的各种频率调节装置，像同步发电机调速系统、负荷频率响应特性等，都会努力调整系统有功功率平衡让频率恢复稳定，然而，光伏电站并网运行后，电网有功功率分布和调节特性改变，频率瞬态变化过程变得更复杂，某些特定情况下，光伏电站输出功率起伏甚至可能与系统频率变化相互作用，导致频率持续振荡难以快速稳定下来。

（三）故障情况下的电流变化

电网要是遭遇短路之类的故障突发状况，电流就会急剧波动，在110千伏变电站接入大规模光伏系统这种架构下，故障电流的大小和特性受故障类型与位置制约且与光伏电站的并网方式和控制策略密切相关，三相短路故障一旦发生，短路点电流瞬间飙升到极值且光伏电站也向故障点注入短路电流，光伏电站逆变器控制特性独特，其输出的短路电流在波形和幅值上跟传统同步发电机提供的短路电流相比差别很大，光伏电站的短路电流可能没直流成分且其幅值和持续时间受逆变器容量和控制策略制约，电流暂

态的演变对电网保护装置很关键，传统继电保护装置是根据电力系统正常运行和故障状态下电流、电压等参数特征设计的，但大规模光伏电站并网后，电流暂态特性变化明显，这可能让保护装置误动或者拒动，某些情况下，光伏电站提供的短路电流可能使保护装置测量电流超过动作阈值进而触发误动，而在另一些情形下，光伏电站的接入改变故障电流分布格局，保护装置可能就没法有效检测故障电流从而导致拒动现象。

三、协调控制策略

（一）基于逆变器的控制策略

光伏电站逆变器经精准操控就能灵活调整其输出功率大小，运用最大功率点追踪（MPPT）这一先进技术可保证光伏电池始终在最大功率点附近高效运行，进而显著提升光伏电站整体发电效能。电网出现异常（如电压波动或者频率超出预设范围）时，逆变器需合理调整输出功率，系统频率下滑时，逆变器控制策略可派上用场，适当削减光伏电站输出功率以缓解系统功率短缺问题并重新恢复系统频率稳定状态。使用功率平滑调控算法能有效抑制光伏电站输出功率的剧烈波动，进一步减轻对电网的冲击和影响。

（二）储能系统的应用与控制

110千伏变电站与大规模光伏电站互联体系里，储能系统的调节作用举足轻重，光伏电站输出功率大幅波动时，储能机制灵活，能量过剩就悄悄蓄积、短缺就适时释放，能有效平缓功率波动，系统故障或受剧烈扰动时，储能系统能快速应变，适时提供或吸纳功率以稳定系统电压和频率，像电网短路故障电压骤降时，储能系统马上启动释放能量，补系统无功功率缺口稳定电压，系统频率下降时，储能系统输出有功功率，缓解功率赤字确保频率稳定。

（三）与电网其他设备的协同控制

大规模光伏发电系统接入110千伏变电站的架构里，同步发电机作为核心设备对系统稳定运行极为关键，若建立同步发电机和光伏电站的协同调控机制则两者优势就能充分发挥，当系统出现频率波动时，同步发电机的调速系统会与光伏电站的逆变器一起应对，同步发电机调节能力强、输出功率能快速调整且能及时响应频率变化，而光伏电站按自身调节潜在关键时参与频率调节以减轻同步发电机运行负担，在电压调控方面，同步发电机的励磁系统和光伏电站的无功补偿控制装置配合默契从而维护系统电压稳定，要全面优化系统需把同步发电机与静止无功补偿器（SVC）、静止同步补偿器（STATCOM）等其他电网无功补偿设备纳入统一协同控制框架，由于这些无功补偿设备各有特点且调节特性和响应速度不同，通过科学协调控制策略就能使系统无功功率精准配置高效利用，当系统电压大幅波动时，SVC能迅速响应并初步提供无功支

持, STATCOM可根据系统实际需求更精细地进行无功调节以保障系统稳定运行。

四、仿真模型建立

要检验提出的电气暂态特性解析与协同调控策略有没有实效,就依托电力系统仿真平台构建了110千伏变电站和大规模光伏电站互联的仿真场景,该模型全面考虑了光伏电站组件细节、逆变器调控机理、储能装置充放电行为以及电网里其他设备的参数和运行习性,且光伏电站采用了高精度光伏电池模型,按照实际情况设定光照强度和温度的动态变化轨迹以模拟输出功率随机起伏特性,110千伏变电站里的变压器、断路器、母线系统等电气设备也都细致建模,从而让模型能全面真实反映系统实际运行状态。

(一) 不同工况下的仿真结果及正常运行工况

正常运作场景下,我们详尽地模拟剖析系统的电气瞬时响应特性,分析成果显示光伏电站输出功率恒定且系统电压和频率能稳在预设安全区间,光照强度缓缓变化时光伏电站输出功率会渐进起伏并使接入点电压随之波动,不过在逆变器的无功补偿调控与电网内其他无功补偿装置协同助力,从而将电压波动有效限制在容许范围内且系统频率也保持相对平稳,这表明正常运作场景下构建的系统模型和采用的控制策略在确保系统稳健运行上效能显著。

(二) 故障工况

电力系统出现异常情况,如模拟电网突发三相短路故障时深入仿真分析了电气暂态特性,短路瞬间故障区域周围电压暴跌如断崖而电流急剧增大,光伏电站并网节点电压受很大冲击波动更厉害,但储能系统立即反应迅速放出储备能量向系统注入无功功率起到关键支撑作用,并且逆变器按预设控制逻辑灵活调整输出功率与同步发电机及各种

无功补偿装置紧密协作应对挑战,经过一段时间动态调整系统电压和频率慢慢稳定下来,仿真数据表明设计的协同控制方案在应对故障工况时电气暂态调节能力出色使系统的稳固性和可靠性大大增强了。

(三) 控制策略有效性验证

我们对比实施协调控制策略前后系统的电气瞬态行为,验证了这一策略的实际效用,没协调控制策略时,系统遇扰动电压和频率振荡幅度大增、复原耗时久且可能不稳定,而用了协调控制策略后,系统遇同样扰动电压和频率波动幅度明显小、复原快且能迅速稳定,就像系统频率下降时,实施策略后频率短时间就能回到额定值附近且波动小,这说明提出的控制策略能大大提升系统电气瞬态性能、增强运行效能。

四、结论

110千伏变电站并入大规模光伏电站后电气瞬态性能被本文深入剖析且光伏并网对系统电压、频次和电流瞬态性能的影响机理与变动趋向也被详尽阐述,基于此文章创新性提出一系列高效协同调控方案,涵盖逆变器功率调节与无功功率补偿控制、储能系统应用与调控策略以及和电网其他组件的联动控制机制,严谨的仿真模拟和实际案例验证有力地证明这些控制策略能使系统电气瞬态性能大幅提升且系统的稳定性和信赖性显著增强,为大规模光伏电站接入110千伏变电站的工程实践奠定坚实理论基础并提供宝贵技术支撑,本研究在110千伏变电站并网大规模光伏电站电气瞬态性能分析和协同控制策略上虽初步有成效但还有好些问题没解决,以后可以进一步探索光伏电站和电网的交互特性并构建更精细数学模型以更精准预测剖析系统电气瞬态响应。

参考文献:

[1]王磊,王浩,王珏,等.特高压变电站电磁暂态过电压机理与控制[J].科技资讯,2016,14(5):2.

[2]苏赋文.直流配电站电压控制策略及暂态过程分析[D].华中科技大学[2025-05-27].

作者简介:羊海山(1989.07.11—)男,汉族,江苏南京,本科,齐丰科技股份有限公司,电力工程-电气工程。