

新能源并网下电力设备谐波治理与运行稳定性研究

于成飞¹, 齐绍森²

(1. 中建材新能源工程有限公司, 上海 200042;

2. 济南锅炉集团有限公司, 山东 济南 250031)

摘要 高比例新能源接入电力系统后,以逆变器为核心的并网设备与电网之间产生复杂的宽频域谐波交互作用,严重威胁系统运行稳定性。本文针对新能源并网引发的谐波问题与稳定性挑战,系统分析了光伏、风电并网系统中谐波产生机理,揭示了弱电网条件下锁相环与多控制环路耦合导致的负阻尼特性及谐波放大机制。基于阻抗建模与稳定性分析理论,提出“源-网-储”协同的谐波治理与稳定性提升技术框架。研究表明,构网型储能与宽频域有源滤波装置的协同应用,可从阻抗重塑与主动阻尼两个维度有效提升新能源并网系统的全局同步稳定性。

关键词 新能源并网; 谐波治理; 运行稳定性; 构网型储能; 有源滤波

中图分类号: TM712

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.24.005

0 引言

我国新能源发电总装机容量已于 2024 年底历史性超越火电,成为我国电力系统装机规模第一大电源。与此同时,风电、光伏发电量在全社会用电量中的占比持续稳步提升,已成为支撑全社会用电增量的核心绿电来源。“双碳”进程深入推进,以电力电子变流器为接口的新能源发电设备在电力系统中的比例不断提高,改变了以往以同步发电机为主导的机电暂态特性。新能源并网设备基本采用跟网型控制方案,是电流源型并网,在锁相环与多级控制环路之间存在非线性耦合,且电网阻抗的宽范围变化,很容易导致宽频域谐波振荡问题。谐波治理与运行稳定性是新能源大规模高效并网的核心技术难题。一方面,新能源场站中几十台甚至上百台逆变器并联运行,各个逆变器开关频率及其边频带产生的间谐波、超谐波在电网阻抗的交互作用下被放大,导致电压畸变率过大;另一方面,当电网为弱电网时,跟网型逆变器的锁相环动态和电流环动态产生负阻尼效应,导致次同步振荡甚至失稳。传统的无源滤波器难以适应电网的宽范围变化,单一的有源滤波器也难以解决系统级的稳定问题。

1 新能源并网谐波产生机理与系统失稳机制

1.1 跟网型逆变器的非线性耦合与谐波产生机理

新能源并网逆变器主要采用跟网型控制结构,即通过锁相环同步电网相位来控制电网中的电流,该控

制范式在强电网条件下较为理想,但随着新能源渗透率及电网阻抗的提高,其自身的非线性耦合问题逐渐凸显。跟网型逆变器产生谐波的原因有三种:一种是锁相环作为非线性部件在电网电压不平衡或畸变时产生相位扰动,此扰动被调制到电流指令中形成一定频率的间谐波分量。有研究表明,当电网电压为 5 次谐波时,通过锁相环可以产生 6 倍频的相位波动,并且对 7 次谐波产生放大。另一种是电流环的比例积分控制器对谐波指令的跟踪由带宽所限,高频谐波分量不但难以被抑制,反而会因为控制器相位的滞后导致谐波畸变。还有一种是直流母线电压控制环与电流环的动态耦合,直流侧电压波动通过调制环节传递到交流侧产生边带谐波。光伏并网三相不平衡故障还会出现一种特殊的间谐波现象,当电网产生不对称故障时,直流母线电压就会产生二倍频波动,该波动被调制到逆变器输出电流中,这种波动的频率与基波的频率之差等于二倍频分量,间谐波可导致保护装置误动。

1.2 弱电网下负阻尼特性与谐波放大机制

新能源并网系统的稳定性与电网强度紧密相关,短路比一般用 3 衡量,当短路比小于 3 时,系统为弱电网,电网阻抗不可忽略,而逆变器和电网之间的交互作用增强。弱电网条件下谐波放大的主要原因是阻抗交互,当逆变器的输出阻抗和电网阻抗在某频率的幅值相等时,相位差达到 180° 时,系统将在该频率出

作者简介: 于成飞 (1986-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力设备工程。

现并联谐振回路,小的谐波扰动会放大成为大的电压/电流振荡。传统分析通常忽略线路的频变特性,但长距离输电场景下电缆分布电容效应使得电网阻抗呈现宽频谐振峰,谐波不稳定的风险较高。跟网型逆变器从阻抗特性上看,在中低频段表现出负阻尼特性,这主要由锁相环主导,锁相环是一个相位跟踪环路,由于其动态特性使得逆变器在特定频段表现出负电阻特性,即有功功率随着电压幅值的增加而减小,不同于同步发电机的正阻尼特性。

1.3 宽频域谐波传播特性与谐振风险辨识

新能源并网系统的谐波问题从传统的整数次谐波发展为间谐波、超谐波等宽频域。不同频段的谐波在电网中的传播特性不尽相同,辨识谐振风险频段是有效治理的前提。风电变流器的 $6k \pm 1$ 次特征谐波、光伏逆变器的开关频率边带谐波均属此类。间谐波(非整数倍基频)则与控制系统动态密切相关,其频率随运行工况变化,难以通过固定频率的滤波器滤除。超谐波($2\text{ kHz} \sim 150\text{ kHz}$)是近年来关注的热点频段。随着电力电子设备开关频率向高频发展,超谐波污染日益严重。长距离输电电缆对超谐波具有特殊的传输特性——由于电缆分布电容在高频下的分流效应,超谐波电流沿电缆传播时呈指数衰减,但其引发的电压畸变可能在电缆末端显著放大。海上风电经长距离海底电缆送出时,这一现象尤为突出。谐振风险的准确辨识依赖于精确的阻抗建模。传统的dq域序阻抗模型无法表征频率耦合效应,为此研究者发展了多谐波线性化建模方法,建立了考虑正负序频率耦合的整体序阻抗模型。

2 谐波治理与稳定性提升协同技术

2.1 多模态有源滤波与谐波抑制技术

宽频域有源滤波器的关键部分是谐波指令的检测与跟踪。采用同步旋转坐标变换的次谐波分量,并运用准比例谐振控制器进行特定次谐波的无静差跟踪,利用数字信号处理器的高效运算进行高频谐波的补偿。为了抑制间谐波和超谐波,需要在控制结构中增加自适应陷波器,实时跟踪扰动频率并产生补偿指令。静止无功发生器除补偿无功外还可兼作有源滤波的功能。改进型三电平静止无功发生器使用中点钳位拓扑,开关频率达到 6 kHz 以上,具备25次以内的主动抑制能力。通过在电压外环中嵌入谐波抑制模块,在保证直流母线电压稳定的同时,对特定次谐波电压进行补偿。有源滤波装置的协同运行是多机并联需要解决的问题。

以浙江舟山 220 kV 海上风电场群示范工程为例,华能岱山风电场与中广核岱山风电场分别给各自配置一套高压有源谐振抑制装置,两套装置电气层面的距离较近,有交互耦合的状况发生。采用双机协同治理模式,按照各并网点谐波限值为约束条件进行解耦控制,每台装置利用独立阻抗重塑方法对谐波电压和电流进行控制,有效避免双机并联运行的控制冲突。长庆油田清洁电力开发项目部在中二供光伏电站中应用的有源电力滤波技术,在2次 ~ 50 次谐波上实现有效补偿。该技术通过实时检测电网中的谐波电流,经电力电子变换输出与谐波大小相等、方向相反的补偿电流,在高效滤除谐波的同时改善三相电流不平衡,提高线路功率因数^[1]。

2.2 构网型储能变流器与阻抗重塑方法

储能系统在新能源场站中配置的比例不断提升,为谐波治理和稳定性提升提供技术解决方案。与跟网型变流器不同,构网型储能变流器采用功率同步控制模拟同步发电机机电特性,从根本上改变并网设备的控制范式。构网型储能变流器的阻抗特性与跟网型变流器不同,构网控制主要采用功率外环和虚拟阻抗内环,输出阻抗幅值相对跟网控制更小,中低频段为正阻尼特性。其对新能源场站整体阻抗特性有很好的改善。对比表明,新能源场站接入构网型储能后,在阻抗交截频率处,其相位裕度由 3.39° 提升到 38.35% ,系统阻尼能力大幅增强。构网型储能的阻抗调控能力主要体现为对新能源场站阻抗特性起主导作用^[2]。

2.3 “源-网-储”协同治理框架与多机协调控制

单一技术手段难以应对新能源并网系统复杂多变的谐波与稳定问题,亟需构建“源-网-储”协同的综合治理框架。该框架涵盖新能源场站侧、电网侧和储能侧三类设备,通过分层控制架构实现协同优化。场站侧治理聚焦新能源机组本身的谐波抑制。通过优化逆变器调制策略、改进锁相环参数设计、嵌入有源阻尼控制,从源头上降低谐波发射水平。网侧治理则以有源滤波装置和无功补偿设备为核心,在公共耦合点进行谐波补偿和电压支撑^[3]。储侧治理发挥储能系统的灵活调节能力,通过构网型控制为系统提供主动阻尼。多机协同控制是“源-网-储”框架落地的关键技术难题。海上风电场群示范工程采用的双机协同模式提供了有益经验:每套高压有源谐振抑制装置以各自并网点谐波限值为约束条件进行独立控制,但同时通过通信系统共享谐波测量信息,实现全局优化。在60余种组合运行工况下的验证结果表明,协同模式

可有效避免装置间的交互耦合,区域电能质量治理效果显著提升。

3 工程应用与实证分析

3.1 基于实测数据的谐波治理效果评估

华能岱山风电场与中广核岱山风电场位于舟山海域,装机容量分别为 100 MW 和 150 MW,通过 220 kV 海底电缆接入陆上电网。两座风电场电气距离较近,存在交互耦合作用,运行初期多次发生因谐波谐振引发的保护动作事件。浙江电力科学研究院牵头设计的高压有源谐振抑制装置双机协同治理模式投入运行后,谐波治理效果显著(见表 1)。实测数据显示:在华能

表 1 双机协同治理模式下谐波治理效果实测数据

治理对象	5 次谐波电流下降比例	5 次谐波电压下降比例
华能岱山风电场	46%	28%
中广核岱山风电场	53%	35%
区域内 220 kV 变电站	—	26%

储能接入前后的系统稳定性进行比较。测试系统为典型的新能源场站模型,包含 6 台 2 MW 跟网型风电机组、1 台 5 MW 构网型储能变流器,通过 35 kV 集电线路接入 110 kV 电网,电网短路比为 3.83,为弱电网工况。采用阻抗分析法进行系统稳定性分析。在系统处于临界稳态状况下,会引发振荡风险,新能源场站的中低频区阻抗特性呈现出负阻尼的情况发生在构网型储能尚未接入时,此时相位裕度仅为 3.39° ,阻抗交截频率达到了 171 Hz;在接入构网型储能之后,由于构网控制所表现出的电压源特性和正阻尼特性,使得场站整体的阻抗特性得到提升。进一步探讨构网型储能对不同电网强度的适应性。在短路比降至 1.86 的极弱电网工况,仅依靠构网型储能基础控制已不可能保持稳定,系统产生次同步振荡,开启自主阻抗适配控制,系统在适配系数的自适应调节下由不稳定过渡到稳定状态,电压电流波形发散振荡收敛为正弦波,验证构网型储能与自适应阻抗控制协同作用在极端工况下的有效性^[5]。

4 结论

新能源并网引发的谐波问题与运行稳定性挑战是新型电力系统建设过程中必须突破的核心技术瓶颈。本文从谐波产生机理、系统失稳机制、协同治理技术到工程应用验证,系统研究了新能源并网下电力设备谐波治理与运行稳定性问题,得出以下主要结论:第一,跟网型逆变器在弱电网条件下的失稳本质是多环路非

岱山风电场,28% 的降幅于 5 次谐波电压处被发现,46% 的下降幅度在 5 次谐波电流上被观测到,在中广核岱山风电场,5 次谐波电流所呈现出的下降幅度达到 53% 被观察到,5 次谐波电压产生的 35% 降低情况也被发现,在该区域中,5 次谐波电压于 220 kV 变电站内平均降低的幅度,被检测出达到了 26%。谐振抑制装置的协同运行不仅降低了各自风电场的谐波水平,还改善了整个区域电网的电能质量^[4]。

3.2 构网型储能接入前后的稳定性对比分析

为进一步验证构网型储能提高了新能源场站稳定性,基于数字储能网公开的仿真测试结果,对构网型

线性耦合导致的负阻尼效应。锁相环与电流环、电压环的交互作用使逆变器在中低频段呈现负电阻特性,与感性电网阻抗共同作用引发次同步振荡。准确认识这一机理是开展有效治理的理论前提。第二,多模态有源滤波与构网型储能协同应用构成谐波治理与稳定性提升的有效技术框架。有源滤波器实现对宽频域谐波的精准补偿,构网型储能通过阻抗重塑提供主动阻尼支撑。两者协同工作,从“滤波”与“阻尼”两个维度提升系统性能。未来,随着构网型控制技术向更高电压等级、更大容量装备拓展,以及人工智能技术在谐波检测与控制参数优化中的应用,“源-网-储”协同治理框架将向智能化、自适应方向发展。

参考文献:

- [1] 孙杨.高渗透率新能源并网下的电网谐波治理与电能质量优化路径研究[J].产业科技创新,2024,06(06):97-101.
- [2] 郭家池,孙晓宁,王丽媛.新能源并网对农村电网稳定性的影响及对策[J].模型世界,2025(14):243-245.
- [3] 张成,赵涛,朱爱华,等.弱电网下并联逆变器稳定性及电能质量治理研究[J].江苏电机工程,2022(03):41.
- [4] 李林.西部高海拔地区新能源项目电气设备谐波治理研究[J].现代工程科技,2025,04(24):9-12.
- [5] 张后谊,古庭赞,高吉普,等.高比例新能源电网下的光伏电站谐波分析与治理[J].电力大数据,2022,25(08):20-28.