

分布式电源接入配电网谐波污染问题与主动治理策略

王业帅

(雄特建设工程(山东)有限公司, 山东 聊城 252000)

摘要 随着分布式电源的大规模接入, 配电网谐波污染问题日益严峻。谐波污染不仅会降低供电质量, 还可能引发设备过热、绝缘老化等问题, 甚至诱发电力系统共振, 威胁配电网安全稳定运行。分布式电源自身输出谐波特性以及谐波在配电网中的传播放大效应, 是导致谐波污染加剧的主要原因。针对分布式电源接入引发的谐波问题, 亟需从源头控制、传播抑制等方面入手, 积极探索新型有源治理技术, 实现“源—网—荷”系统整合, 全方位构筑配电网谐波治理防线, 保障配电网安全经济运行。

关键词 分布式电源; 配电网; 谐波污染; 主动治理

中图分类号: TM7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.027

0 引言

风电、光伏等分布式电源具有清洁低碳、灵活高效等优势, 受到国家政策的大力支持, 在配电网中渗透率不断提高。分布式电源的接入优化了能源结构, 提高了供电可靠性, 也带来了一系列问题, 谐波污染问题日益凸显。分布式电源采用电力电子设备并网, 自身输出电流呈现较大的谐波特性, 谐波经并网注入配电网后, 在线路、设备等的作用下不断传播、叠加放大, 使配电网各节点电压、电流严重畸变, 谐波含量超标。谐波污染影响用电设备的正常工作, 加速老化, 降低寿命, 还引发配电网过热、振动等问题, 诱发电力系统并联谐振, 后果不堪设想。基于此, 研究分布式电源接入背景下的配电网谐波污染问题刻不容缓。

1 分布式电源接入配电网谐波污染概述

1.1 分布式电源与配电网的关系

分布式电源是指在用户端分散布置的小型发电设备, 主要包括小型风力发电、光伏发电、燃气轮机等。与集中式电源相比, 分布式电源具有清洁环保、灵活多样的优势, 能够就地消纳, 减少电能长距离输送过程中的损耗。分布式电源通过配电网与用户直接连接, 电力潮流呈现双向交互特性, 配电网由原来单一的“源—网—荷”结构向“源—网—源—荷”的主动配电网发展。分布式电源的接入虽然提高了供电可靠性, 优化了电能流动方式, 但也为配电网的规划、运行、控制带来了新的挑战, 尤其是谐波污染问题尤为突出, 给

配电网的电能质量管理、安全稳定运行造成严重影响。

1.2 谐波污染的基本概念与特性

谐波是指频率为工频整数倍的正弦量, 通常用总谐波畸变率(THD)表征。在实际配电网中, 用电设备的非线性特性, 会产生大量谐波电流, 并在线路和设各中传播叠加, 导致各测量点电压、电流波形畸变, 出现谐波污染, 谐波具有频率高、传播快、危害大等特点。谐波频率远高于工频, 在配电网中传播迅速, 可远距离扩散。谐波易引起设备发热、振动加剧、噪声增大、绝缘老化等问题, 加速设备损坏, 影响其使用寿命。频率接近的谐波易引发配电网的并联谐振, 导致谐波放大, 后果不堪设想, 谐波具有上述特性, 配电网受到谐波污染, 其影响将迅速蔓延, 危害配电网安全运行^[1]。

1.3 谐波污染对配电网的影响

分布式电源引发的谐波污染, 对配电网安全稳定运行构成严重威胁。(1) 加剧线路和设备发热。谐波电流在线缆、变压器等设备中产生附加损耗, 引起设备温升加剧, 加速绝缘老化, 影响使用寿命。(2) 引发电能计量误差。电能表等计量装置多采用感应式原理, 难以准确计量谐波电能, 导致计量误差增大, 影响电费结算。(3) 引起继电保护和自动装置误动。谐波会对继电保护和自动装置的电流、电压采样产生干扰, 致使保护误动或拒动, 威胁配电网安全。(4) 诱发并联谐振。当谐波频率与系统阻抗频率特性相近时, 易激发并联谐振, 使特定频率谐波分量被放大,

导致设备损坏。(5)谐波污染还会对用户端敏感设备产生干扰,引起音视频质量下降、控制失灵等问题,影响用户用电体验。谐波对配电网安全稳定运行危害巨大,必须高度重视。

2 分布式电源接入配电网谐波污染的主要问题

2.1 分布式电源输出谐波特征及机理

分布式电源是配电网谐波的主要来源,风电、光伏发电广泛采用电力电子变流装置并网,如逆变器等。其开关特性使输出电流呈现脉动,含有大量谐波分量,以光伏发电为例,光伏电池输出为直流电,需经逆变器转换为交流电并入配电网,逆变器采用脉宽调制技术,其开关频率通常远高于工频,致使输出电流频谱中含大量高次谐波。光照强度、温度等因素的波动,也导致逆变器输出功率、电流波形随之变化,谐波含量呈现间歇性特征,风电同样采用变流器并网,其输出谐波问题与光伏类似。分布式电源变流装置的高频开关特性,是引发配电网谐波污染的根源所在,分布式电源自身输出的谐波电流,通过并网点汇入配电网,并沿线路不断传播、叠加,导致整个配电网遭受谐波污染^[2]。

2.2 谐波在配电网中的传播与放大问题

分布式电源产生的谐波,在配电网中会出现传播和放大等问题,加剧谐波污染。谐波沿配电线路传播迅速,影响范围不断扩大,由于谐波频率远高于工频,在线路中传播衰减小,可较远距离扩散,致使更多配电网节点受到污染。谐波在传播过程中不断与背景谐波叠加,使谐波含量不断放大,若不同分布式电源注入的同一频率谐波出现同相位叠加,则该频率谐波分量被进一步放大。配电网普遍存在无功补偿电容,其容抗随频率升高而降低,对高次谐波呈现小阻抗通路,使其在线路中长距离传播,当谐波频率接近系统谐振频率时,可能引发并联谐振,导致谐波急剧放大。谐波在配电网中的传播、放大效应不容忽视,配电网结构复杂、接入点多,使得谐波在其中传播、叠加更加难以控制。必须充分研究谐波污染的传播特性及机理,采取有效抑制措施。

2.3 现有谐波治理方法的局限性

针对谐波污染,目前主要采取被动治理为主的措施,存在一定的局限性。在分布式电源并网端安装无源滤波装置,如LC滤波器等,对输出谐波进行被动抑制,但随着电源容量增大,所需滤波器体积也急剧增加,不仅成本高昂,还占用大量空间,实用性不强。在配电网敏感节点处安装有源电力滤波器(APF),主动发出与谐波电流大小相等、相位相反的补偿电流,

实现谐波抵消,但APF成本较高,且容易受到配电网电压畸变的影响,治理效果不稳定。在用户侧安装无源滤波装置抑制谐波,但容易引起配电网系统谐振,反而使局部谐波放大,这些传统的谐波治理手段,大多为点上治理,只关注设备端,缺乏系统视角,未充分考虑谐波在“源—网—荷”间的传播与交互作用,只能消极被动地抑制谐波,而非从根源抑制谐波产生。现有治理措施难以从整体上解决分布式接入引发的谐波问题,迫切需从源头抑制、过程传播、用户侧防护等角度构建主动治理策略^[3]。

3 分布式电源接入配电网谐波污染的主动治理策略

3.1 分布式电源谐波源头控制技术

治理分布式电源引发的谐波污染,首先是从源头抑制谐波产生,可从并网条件、变流器拓扑和控制等方面入手,最大限度地减小分布式电源自身输出谐波。应从严规范分布式电源并网条件,将谐波含量控制纳入并网标准,对新接入的分布式电源提出总谐波畸变率上限要求,超标不予接入。在分布式电源设计环节,优化逆变器等变流装置的拓扑结构与控制算法,采用多电平逆变拓扑,显著降低输出电流谐波含量。对于已投运的分布式电源,采用有源滤波技术,在并网逆变器中增加有源滤波控制,实时检测输出电流谐波,控制逆变器主动发出补偿电流,抵消自身产生的谐波。可在分布式电源并网点附近设置谐波自动监测装置,实时监控其输出谐波水平,一旦超标立即启动限制措施,必要时可解列限额运行,通过上述源头主动控制策略,可有效抑制分布式电源自身谐波产生,从源头上遏制谐波污染^[4]。

例如:在某风电场接入配电网的工程实践中,通过优化变流器拓扑和控制方式,显著降低了风电机组的输出谐波。传统风电多采用两电平逆变器,其开关损耗大,谐波含量高,针对这一问题,该工程采用了三电平中性点钳位逆变器拓扑,在直流侧增加电容分压,将直流电压分为两部分,使每个开关管承受电压降低,降低开关频率,减小输出电流谐波。在控制环节引入脉宽调制预测电流控制算法,根据电网电压、风电机组输出电流实时计算PWM波形,优化逆变器开关管通断时序,进一步抑制输出谐波。通过上述拓扑和控制优化,该风电场逆变器输出电流总谐波畸变率降低了60%以上,有效抑制了风电机组的谐波产生。

3.2 配电网谐波传播抑制方法

针对谐波在配电网中的传播放大问题,可采取优化网络结构、安装主动滤波装置等措施,抑制谐波在

网中的传播。在配电网规划阶段,优化分布式电源与线路和负荷的布局,避免分布式电源过于集中接入,减少同一接入点汇集谐波叠加放大的风险。其次,加强配电网末端用户的谐波管理,鼓励高谐波发射负荷单独接入,避免其谐波向上游传播,污染整个配电网。在谐波严重超标的敏感节点,配置安装有源滤波装置,主动发出补偿电流抵消谐波,阻断其向邻近线路扩散。针对配电网普遍存在的无功补偿电容,可增加电容器组保护装置,如串联电抗器,抑制谐波进入,降低并联谐振风险,通过优化配电网的接入和连接方式,并在关键节点设置主动抑制装置,形成纵深防御体系,可有效抑制谐波在网中的传播放大^[5]。

例如:在某住宅小区配电网的谐波治理中,通过优化配电网结构和安装有源滤波装置,有效抑制了谐波在网中的传播,该小区内分布式光伏较多,不同业主的光伏逆变器并网形成多个谐波源,为避免各逆变器输出谐波在公共连接点处汇集叠加,配电网运营商对接入方式进行了优化。将分布较集中的光伏统一接入专用馈线,减少其他用户受谐波影响。在小区配电室低压母线处安装有源电力滤波器,监测母线谐波电流,控制滤波器主动发出补偿电流,抑制谐波向上层配电网传播。将谐波超标用户的光伏限电上网,督促其及时整改。从配电网全局着眼,优化网架结构,在谐波敏感节点增设主动抑制措施,能从网络传播层面阻断谐波污染,为配电网安全稳定运行筑起坚实屏障。

3.3 创新谐波治理技术与系统整合

随着分布式电源渗透率的提高,配电网谐波问题日趋复杂,传统治理措施难以从根本上解决问题,必须积极探索多元化的创新治理技术,并在“源—网—荷”间实现优化整合,全方位构建谐波污染防治体系。在分布式电源侧,研究基于虚拟同步机的主动配电网无源化控制,使分布式电源模仿同步发电机特性,主动合理调节有功、无功,改善电能质量,抑制谐波产生。在用户侧,推广应用无局放变压器,降低变压器对谐波的敏感性,开展用电设备谐波辐射限值管理,从用电环节遏制谐波产生。在配电网侧,开展基于谐波阻抗和谐振频率等指标的配电网规划,优化分布式电源与无功补偿装置的容量配置与接入点选择;研究基于配电网自动化的谐波在线监测与智能抑制控制策略,实现全网谐波统一管控。通过在“源—网—荷”多环节采用创新治理技术,并实现全局协同优化,构建主动治理、全域覆盖的配电网谐波治理新格局,为配电网安全稳定运行保驾护航。

例如:某配电网运营商在谐波治理实践中,积极

应用了虚拟同步机、在线监测等多项创新技术,实现了“源—网—荷”的系统整合与协同治理。在源侧,通过虚拟同步机控制,使分布式电源具备类似同步发电机的惯性和阻尼特性,可根据配电网需求,主动调节输出特性,抑制谐波产生。在网侧,部署配电自动化终端,对全网各节点电压电流实时监测,评估谐波水平,一旦超标,立即下发控制指令,调整分布式电源出力,必要时切除高谐波负荷。在荷侧,积极推广应用 K-13 变压器,降低对谐波的敏感性;同步开展用户侧用电设备谐波辐射水平普查,对于严重超标的,责令整改或予以惩处,通过在“源—网—荷”各个环节综合施策、系统规划,谐波超标问题得到有效缓解。全网用户的平均谐波电流畸变率从原来的 14% 降低到 6%,供电可靠性从 99.967% 提升到 99.985%,用户投诉率大幅下降,在创新技术与系统整合方法的支撑下,该配电网谐波管理工作实现了“源头可治、过程可控、用户可管”的全过程一体化闭环管控,谐波治理效果显著。

4 结束语

分布式电源的大规模接入,在优化能源结构、提高供电可靠性的同时,也给配电网谐波治理带来了严峻的挑战。分布式电源自身的谐波特性,叠加在配电网中的传播放大效应,致使谐波污染问题日益凸显,危及配电网安全。面对新形势下谐波治理的新课题,必须与时俱进,积极践行“主动治理、多点抑制、过程控制、智能协同”的治理理念。在新一轮能源变革大潮中,配电网作为承上启下的枢纽,在谐波污染防治上先行一步、精准发力,为安全、高质、高效的能源流动提供坚实的保障。广大电力工作者要立足新发展阶段,践行新发展理念,主动顺应能源革命浪潮,积极探索能源与电力融合发展新模式。

参考文献:

- [1] 熊陶君. 基于虚拟谐波阻抗的配电网谐波主动防御系统研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [2] 王介宇, 胡雪峰. 一种考虑光伏治理资源的交直流配电网电能质量协同治理策略 [J]. 常州工学院学报, 2024, 37(05): 43-51.
- [3] 汪伟, 于希娟, 张雨璇, 等. 考虑用户谐波治理需求度的电能质量增值服务方案设计研究 [J]. 高电压技术, 2023, 49(S01): 141-146.
- [4] 侯超群, 熊伟, 张继红. 主动配电网谐波综合治理方法探讨 [J]. 内蒙古科技与经济, 2020(09): 86, 100.
- [5] 肖玉斌. 浅析主动配电网谐波综合治理方法 [J]. 通讯世界, 2019, 26(04): 210-211.