

电力计量中电力谐波的影响与有效措施

徐建生¹ 谢腾跃² 陈弘³

1. 国网浙江省电力有限公司绍兴供电公司 浙江 绍兴 312000

2. 国网浙江省电力有限公司绍兴供电公司越城供电分公司 浙江 绍兴 312000

3. 国网浙江省电力有限公司绍兴供电公司滨海供电分公司 浙江 绍兴 312000

摘要: 电力谐波对电力计量影响重大, 不仅会导致电能表计量误差、互感器性能下降, 还会引发计量系统稳定性问题。本文深入剖析了电力谐波影响电力计量的深层机理, 包括谐波与基波叠加原理、计量装置频率响应限制以及谐波传播与耦合路径。并从谐波源头治理、计量装置改进、系统优化与管理三方面提出了一系列有效措施, 以降低电力谐波对电力计量的影响, 保障电力交易的公平性与准确性。

关键词: 电力计量; 电力谐波影响; 有效措施

引言

在电力系统中, 电力谐波问题日益突出。随着各类非线性负载设备的广泛应用, 谐波的产生不可避免。电力计量作为电力交易和管理的关键环节, 其准确性直接关系到供电企业和用户的切身利益。然而, 电力谐波的存在却对电力计量产生了诸多不利影响, 干扰了计量装置的正常运行, 导致计量结果出现偏差。因此, 深入研究电力谐波对电力计量的影响及有效应对措施具有重要的现实意义。

1 电力谐波对电力计量的直接影响

1.1 电能表计量误差

传统电能表设计基于基波频率(50Hz), 其计量原理依赖电压与电流基波分量的乘积积分。当谐波存在时, 电压与电流波形发生畸变, 导致电能表记录值与实际消耗值产生偏离。在用户侧非线性负载产生谐波并注入电网的场景下, 电能表记录值中包含谐波功率。由于谐波功率并非用户实际消耗的基波功率, 此时计量值会高于实际基波消耗值, 形成正误差。相反, 当电网侧谐波污染用户设备时, 谐波功率会抵消部分基波功率, 使得电能表记录值低于实际基波消耗值, 产生负误差^[1]。更为复杂的是, 谐波相位、幅值及负载特性处于动态变化状态。这种动态变化使得误差方向难以预测, 可能在正误差与负误差之间频繁切换。长期累积下来, 这种不确定性的误差容易引发计量纠纷, 影响电力交易的公平性与准确性。

1.2 互感器性能下降

电压互感器(PT)和电流互感器(CT)作为计量系统的核心传感器, 在谐波作用下性能会显著劣化。谐波频率升高会导致互感器铁芯磁导率下降, 磁通密度增加。当磁通密度超过一定限度时, 易引发铁芯饱和现象。铁芯

饱和后, 互感器的变比误差会明显增大, 影响计量精度。传统互感器设计主要针对基波频率, 对高次谐波(如3次、5次、7次)的响应存在偏差。在幅值响应方面, 高次谐波的幅值测量不准确; 在相位响应方面, 二次侧信号的相位与一次侧信号相位存在差异, 导致二次侧信号失真, 进而影响计量结果的准确性。谐波与基波叠加后, 互感器总误差不仅包含幅值误差, 还包含相位误差。并且, 随着谐波次数的增加, 总误差呈非线性增长趋势, 进一步降低了互感器的性能。

1.3 计量系统稳定性问题

谐波干扰会对计量系统整体稳定性造成不利影响。谐波会导致电压、电流瞬时值波动, 使得电能表采样数据偏离真实值。这种偏离可能引发计量数据跳变, 即数据在短时间内出现大幅变化; 也可能导致周期性波动, 使计量数据呈现规律性的起伏, 影响计量的连续性和稳定性。谐波还会通过电磁耦合进入计量通信线路, 如RS485、载波通信等。一旦谐波进入通信线路, 会造成数据传输错误, 如数据丢失、乱码等, 甚至导致通信中断。这会严重影响远程抄表和实时监控功能的正常实现, 降低电力系统的智能化管理水平。长期暴露在谐波环境下, 计量装置的电子元件(如电容、电阻)参数会发生漂移, 绝缘材料会加速老化。这些变化会缩短设备的使用寿命。

2 电力谐波影响电力计量的深层机理

2.1 谐波与基波的叠加原理

在电力系统的实际运行中, 电压和电流并非单纯的基波形式, 而是基波分量与谐波分量的复杂叠加。计量装置在进行电能计量时, 记录的是电压与电流瞬时值的积分。从数学角度来看, 这个积分结果并非仅包含基波功率, 还涵盖了谐波功率以及基波与谐波之间的交叉项

功率。传统电能表的设计初衷是准确计量基波功率，其内部结构和计量算法都是围绕基波特性展开的^[2]。然而，当谐波功率混入计量过程后，就如同在纯净的计量体系中引入了杂质。由于传统电能表无法有效区分基波功率和谐波功率，谐波功率的参与必然导致计量结果与实际基波消耗值出现偏差，从而产生计量误差。这种误差的大小和方向取决于谐波的含量、相位以及负载特性等多种因素。

2.2 计量装置的频率响应限制

不同类型计量装置的频率响应特性存在差异，这使其在面对谐波时表现出不同的计量表现。电能表方面，感应式电能表通过转盘扭矩来实现计量，其扭矩与电压、电流基波乘积成正比。但在谐波存在时，它对谐波功率的响应存在明显偏差，无法准确计量谐波功率带来的影响。电子式电能表采用采样和数字处理技术进行计量，看似更为先进，但其精度同样受到采样频率和算法的限制。当高次谐波出现时，可能会引发频谱泄漏或混叠现象。频谱泄漏会导致谐波能量分散到其他频率点，而混叠现象则会使不同频率的信号相互干扰，最终影响电能表对电能的准确计量。互感器作为计量系统中的关键传感器，其频率响应特性也至关重要。互感器铁芯的磁导率会随着频率的升高而降低，这使得在高次谐波环境下，励磁电流显著增大。励磁电流的变化会直接导致互感器的变比误差和相位误差大幅增加。例如，在5次谐波（250Hz）的作用下，电流互感器（CT）的相位误差可能达到基波时的3-5倍，严重影响了计量的准确性。通信模块在计量系统中负责数据的传输和交互，其频率响应同样不容忽视。谐波可以通过空间辐射或传导耦合的方式进入通信线路，干扰信号的调制解调过程^[3]。在调制解调过程中，谐波的干扰可能导致数据帧出现错误或丢失，使得计量数据无法及时、准确地传输，进而影响计量数据的实时性和完整性。

2.3 谐波传播与耦合路径

谐波在电力系统中的传播和耦合方式多样，这也是其影响范围广泛的原因之一。传导耦合是谐波传播的主要途径之一，谐波电流通过公共连接点（PCC）注入电网后，会沿着输电线路向其他用户侧计量点传播。在这个过程中，谐波电流会干扰沿途的计量装置，导致计量误差的产生。辐射耦合则是高次谐波的特殊传播方式。高次谐波会产生较强的电磁场，这个电磁场会通过空间辐射的方式干扰邻近的计量设备。例如，谐波电磁场可能会干扰计量设备通信线路的信号传输，或者影响电子元件的正常工作，从而影响计量的准确性。共模/差模干扰也是谐波影响计量的重要方式。谐波可以以共模形式存

在于导线与地之间，也可以以差模形式存在于相间。无论是共模干扰还是差模干扰，都可以通过互感器或电缆电容耦合进入计量回路，对计量装置产生干扰，进而影响电力计量的准确性。

3 抑制电力谐波对电力计量影响的措施

3.1 谐波源头治理措施

非线性负载是产生电力谐波的主要源头之一。对其进行优化配置是抑制谐波产生的基础。电力电子设备，如变频器、整流器等，在运行过程中会向电网注入谐波电流。因此，要严格限制这些设备的谐波电流注入量，确保其满足谐波电流限值要求。在设备接入电网前，需进行严格的检测和评估，避免谐波超标设备接入，从源头上减少谐波的产生。无源滤波器是治理谐波的常用手段。在谐波源附近安装单调谐或高通滤波器，能够有针对性地吸收特定次数的谐波。由于不同负载产生的谐波特性存在差异，滤波器的参数需根据负载特性进行定制化设计。通过合理配置滤波器参数，可以有效降低电网谐波电压畸变率，改善电网的电能质量^[4]。有源电力滤波器（APF）则具有更强的动态谐波抑制能力。它能够实时监测电网中的谐波电流，并迅速注入与之大小相等、相位相反的补偿电流，从而实现动态谐波抑制。APF特别适用于谐波含量高且变化快的场景，例如数据中心、冶金行业等。在这些场景中，谐波的频率和幅值变化频繁，有源电力滤波器可以快速响应并有效抑制谐波，保障电力计量的准确性。随着分布式电源的广泛应用，其产生的谐波问题也日益凸显。对于光伏逆变器、储能变流器等分布式电源，应采用多电平拓扑或谐波抑制算法，减少并网谐波污染。分布式电源并网前，严格的谐波测试必不可少。若谐波未经控制进入电网，会干扰电力计量，导致数据偏差，影响电网稳定运行与精准管理。只有通过测试，确保其谐波指标符合并网标准，才能从源头杜绝谐波隐患，保障电力计量准确可靠，维护电网安全有序。

3.2 计量装置改进措施

研发宽频带电能表是改进计量装置的重要方向。传统电能表无法准确区分基波功率和谐波功率，而宽频带电能表通过硬件滤波或软件算法，能够将基波功率和谐波功率分离，分别进行计量。它可以提供基波电能、谐波电能及总电能数据，满足谐波责任划分的需求，为电费结算提供更准确的依据。互感器作为计量系统中的关键设备，其性能直接影响计量的准确性。设计抗谐波互感器，采用非晶合金铁芯或纳米晶材料，可以提高互感器的磁导率，降低磁滞损耗。同时，优化绕组结构，降低高频阻抗，将互感器的频率响应范围扩展至2kHz以上。

这样可以使互感器在高次谐波环境下也能准确计量,减少高次谐波误差,提升计量精度。电子式电能表的采样与算法优化也至关重要。采用高采样率($\geq 16\text{kHz}$)和抗混叠滤波器,可以更准确地采集电压和电流信号,减少频谱泄漏。结合窗函数或频谱校正算法,能够抑制混叠干扰,提高谐波功率计量精度。通过这些技术手段,电子式电能表可以更准确地反映电网中的电能情况,降低谐波对计量的影响。通信模块的屏蔽设计对于保障计量数据的可靠传输至关重要。对计量通信线路采用双绞线或光纤传输,可以减少电磁干扰。增加磁环或滤波器可以进一步抑制高频谐波干扰。在高谐波环境中,电磁干扰严重威胁电力计量数据传输。普通通信方式易受其影响,出现数据异常。而光纤通信优势显著,它以光为信息载体,能完全规避电磁干扰。无论谐波情况多复杂,光纤都能稳定、快速地传输数据,保证计量数据实时更新、完整无误,为电力计量精准可靠运行提供有力支撑。

3.3 系统优化与管理措施

合理布局计量点是系统优化的重要环节。在谐波污染严重区域,如工业园区,增设计量点,通过多点监测可以更准确地定位谐波源。计量点布局需充分考虑电网拓扑和谐波传播路径,确保监测覆盖关键节点,为谐波治理提供有力的数据支持。建设谐波监测网络可以实现谐波的动态跟踪。部署谐波监测终端,实时采集电压、电流谐波参数,构建谐波数据库。通过对这些数据的分析和处理,可以了解谐波的变化规律,为计量装置校准和系统优化提供依据,及时发现并解决谐波问题。定期校准计量装置是保证计量准确性的必要措施。制定谐波环境下计量装置校准规范,增加谐波响应测试项目,确保装置在全频率范围内精度满足要求^[5]。校准周期需根据谐波污染程度进行调整,在污染严重区域应缩短校准周期,及时发现并纠正计量装置的误差。加强用户侧谐波

管理可以有效减少谐波对电网的影响。建立用户谐波排放档案,对超标用户实施限期整改或收取谐波惩罚电费。通过技术手段和经济措施相结合的方式,引导用户主动治理谐波,从用户端减少谐波的产生和传播。建立跨部门协同机制可以整合各方资源,提升谐波治理效率。供电企业与用户、设备制造商建立谐波治理协同平台,共享谐波监测数据,联合制定治理方案。通过跨部门合作,可以充分发挥各方的优势,形成合力,降低谐波对计量系统的整体影响,保障电力系统的安全稳定运行和电力计量的准确性。

结语:

电力谐波对电力计量的影响是多方面的且较为复杂,从计量误差的产生到系统稳定性的破坏,都给电力行业的正常运行带来了挑战。通过谐波源头治理、计量装置改进以及系统优化与管理等一系列综合措施的实施,能够有效抑制电力谐波对电力计量的不良影响,提高电力计量的准确性和可靠性。这不仅有助于保障电力交易的公平公正,也为电力系统的安全稳定运行提供了有力支撑,推动电力行业朝着更加高效、优质的方向发展。

参考文献:

- [1]李炳要,侯玉,陈薇.电力计量中的谐波的影响与措施[J].集成电路应用,2021,38(10):98-99.
- [2]邓国学.浅议电力计量中电力谐波的影响与措施[J].应用能源技术,2020(12):37-39.
- [3]张焯.电力计量中电力谐波的影响与防范措施[J].电力系统装备,2020(16):87-88.
- [4]赵逸.电力谐波对电能表电能计量的影响及应对措施[J].光源与照明,2023(6):177-179.
- [5]黎庆辉.电力谐波对电能计量影响的探究[J].中国标准化,2020(22):201-202.