

谐波治理技术在供配电系统中的运用

赵 炳 朱红星

南水北调中线信息科技有限公司 北京 100038

摘 要：随着大量电力电子设备接入到供配电系统中，谐波污染问题越来越严重，影响电能质量、设备正常工作以及系统稳定运行等。本文总结归纳供配电系统中谐波产生的原因及其传播特点，在此基础上，介绍了目前常用的三种谐波治理方法即无源滤波、有源电力滤波以及混合型滤波器的工作原理、电路结构和应用范围等内容并给出了工程设计时应注意的问题。分析表明各种方法各有利弊，混合型方案以及协调控制是提高谐波治理效果的有效途径。本文目的在于给供配电系统的谐波治理提供一种思路和技术指导。

关键词：谐波治理；供配电系统；无源滤波器；有源电力滤波器

引言

在当今供配电系统中，由于大量的变频器、整流器、开关电源以及电弧炉等非线性负载的应用，造成供电系统的电流波形发生畸变而含有大量的非工频整数倍频率的谐波分量。这些谐波电流注入到电网当中除了增加了线路的损耗，降低了功率因数之外还会导致电气设备发热、继电保护误动作、电费计量误差以及通讯干扰等问题的发生。因此根据国际电工委员会的标准以及中国国家标准（GB/T14549-1993）对于不同电压等级电网的允许谐波含量都有严格的要求，所以供电系统必须采取相应的措施进行谐波的治理。随着谐波治理技术的发展和完善，已经由最初的单纯的 LC 无源滤波发展成为现在的有源动态补偿以及两者相结合的方式共同治理谐波。

1 供配电系统谐波特性与传播机理

1.1 谐波源分类与频谱特征

供配电系统中谐波源根据其非线性性质可以分为两类：电压型谐波源主要包括具有滞后特性的铁磁元件，如变压器励磁涌流所引起的奇次谐波；电流型谐波源是大多数电力电子变流设备，它们的输入电流是脉冲式的，含有大量的 $6k \pm 1$ 次 ($k > 0$) 特征谐波，比如三相桥式整流器会产生 5、7、11、13 次等谐波。另外，电弧炉、电焊机之类的时变阻抗负载也会产生非特征谐波甚至间谐波，频率范围更广^[1]。谐波幅值一般随着次数增大逐渐减弱，在一定条件下，高次谐波会被放大而导致局部较大畸变。

1.2 谐波在电网中的传播规律与阻抗特性

谐波电流在供配电系统中传输受供电系统阻抗频率

相关性影响，在输电线路、变压器以及负载中都存在等效阻抗随着频率增加而增大的情况，但是并联电容器和电缆对于地电容却会使系统在一定频率上发生并联或串联谐振现象，在谐波频率接近该系统自身谐振频率情况下，谐波电流会被放大数倍甚至几十倍，造成母线电压严重畸变；另外谐波有方向性，上游电网产生的谐波背景电压可以传入下游低压用户端，同时用户端产生的谐波也可以反馈到上级电网，即存在双向耦合作用，所以谐波治理不能仅局限于某一台设备，而应该考虑整个系统的各个节点上谐波阻抗以及其衰减能力。

1.3 谐波对供电设备的影响机理

谐波对供电设备造成危害主要是热效应、绝缘应力以及误动作。对于变压器来说，谐波电流增大铜损、涡流损耗，同时谐波磁通造成的铁心及附件的附加损耗，温度明显升高；对于旋转电机，谐波产生附加转矩和脉动转矩，造成机械振动和噪音；电力电容器对于谐波非常敏感，在谐波作用下，由于容抗随频率增加而减小，谐波电流进入电容器会造成过载、发热，加速介质老化；另外，谐波电压畸变会造成电能计量不准，甚至会使静态无功补偿装置（SVC）、继电器等发生误动。了解这几种情况是选择相应措施的前提条件。

2 无源滤波技术及其适用性

2.1 单调谐与双调谐滤波器的设计原理

无源滤波器（PPF）是由电力电容器、电抗器以及电阻等元件按照一定方式连接组成的设备，对谐波提供一条低阻抗放通路径。单调谐滤波器串联谐振在一特定次数谐波上，使得这一次数谐波电流绝大部分被引入到滤波支路中，从而减小母线上的谐波含量，在设计时需要

选择谐振频率、品质因数以及无功补偿量。而双调谐滤波器则是两个谐振支路并联，可以同时滤去两个相邻频次的谐波，比如 5 次和 7 次谐波等，这样就可以减少支路的数量，节约空间^[2]。调谐频率应当考虑到电网频率变化以及元器件本身的误差，在一般情况下，谐振点选取稍小于目标谐波频率即可满足要求。

2.2 高通滤波器的特性

高通滤波器（HPF）是一种宽频带滤波器，在其截止频率之上具有很低的阻抗，在此频率之上表现为低阻状态，用于衰减高次谐波（如 11 次及以上）。一般是一阶或者二阶 RC/RL 网络，与电容并联。高通滤波器对于高频有较好的衰减作用，而且可以避免高次谐波产生谐振放大，但是它对于基波衰减较大，品质因素较低，通常不用作主要滤波器，而是和其他单调谐滤波器结合起来形成一种复合滤波器。

2.3 无源滤波的局限性与参数失谐问题

无源滤波装置虽结构简单、成本低且容量大，但存在显著局限：一是滤波效果受电网阻抗及频率影响大，条件变化或元件老化易致谐振点位移，引发谐波放大；二是仅能消除固定次数谐波，难以应对动态谐波源；三是基波无功补偿易出现过/欠补偿，参数失谐（如电容、电感变化）会改变谐振频率，导致效果不佳。鉴于现代供电系统谐波源复杂，仅靠无源滤波已难达理想效果。

3 有源电力滤波技术

3.1 有源滤波器的工作原理与拓扑结构

有源电力滤波器（APF）基于电力电子变流技术，通过对电网注入大小相等而方向相反的补偿电流来消除谐波，即把非线性负载看作谐波源，APF 监测到非线性负载产生的谐波后，在逆变器中生成相应大小但相反方向的补偿电流注入到公共耦合点（PCC），从而使得电源侧电流为正弦波形。主电路结构一般采用电压源型 PWM 逆变器，利用电容进行储能，在 IGBT 或者 SiC 等开关元件控制下输出补偿电流^[3]。根据连接方式的不同可以分为并联式、串联式以及串并联式三种类型，而并联式 APF 使用最多，易于安装维护并且不会对原有系统造成影响。

3.2 谐波检测算法

当前最常用的方法是基于瞬时无功功率理论（即 p-q 法或者 ip-iq 法），通过 Park 变换将三相瞬时电压以及电流转换到 $\alpha\beta$ 坐标下，在此基础上使用低通滤波器获取基波有功及无功分量，其差值就是需要发出的谐波补偿

指令，此方法快速响应并且准确性较高，同时支持三相平衡或者不平衡情况，而在单相情况下可以采用基于同步参考坐标系或者自适应陷波滤波法进行谐波检测，近年来也有学者提出基于 FFT 的滑动窗口法以及基于小波变换的方法来进行谐波检测，但是这两种方法在在线应用上计算量较大，一般工程上由于其实现简单并且鲁棒性好，所以使用较多的是 ip-iq 法。

3.3 电流跟踪控制策略

一般使用的电流跟踪方法有滞环比较控制、三角波比较控制以及无差拍控制等。滞环比较控制的优点是响应速度快、硬件简单，但是其开关频率不是恒定的，会带来一定的高频干扰；而三角波比较控制利用载波来调制得到稳定的开关频率，输出谐波较低，但是响应速度相对较慢；无差拍控制利用预测的方法在一个采样周期内跟随给定值，适合于数字控制系统，但是对模型要求较高；另外还有重复控制、比例谐振（PR）控制等方法也能在某一些特定频率上起到很好的改善效果，如可以对 5、7 次谐波等主要谐波进行定点消除。

3.4 有源滤波的优缺点

APF 最突出的优点是灵活性以及对谐波的实时抑制能力，可以滤除多种次谐波，而且不受电网阻抗的影响，不会发生谐振的问题。此外还可以有无功补偿以及三相不平衡的功能，具有多种功能。但是 APF 受到所用电力电子器件耐压能力和电流承载能力的限制，一般一台 APF 不能满足大功率场合的需求，价格昂贵、损耗严重并且控制难度大，对于操作人员的技术水平要求较高，所以 APF 主要应用于低压、小容量并且谐波频繁变化的地方，例如：数据中心、医院、地铁等。

4 混合型谐波治理技术

4.1 有源无源混合滤波系统结构

为了结合无源滤波大容量以及 APF 灵活性优点，出现了混合型滤波器（HAPF）。即由无源滤波器组和 APF 串联或者并联构成。而在并联混合方式下，无源滤波器完成大部分谐波滤除以及基波无功补偿，APF 只需消除剩余一部分谐波或者防止系统发生谐振即可大大减小有源部分所需容量；而在串联混合方式下，APF 经由耦合变压器接入线路上，用很小的逆变侧电压就可以改变无源滤波器谐振频率起到主动阻尼作用^[4]。混合结构既能达到良好效果又能降低成本并且节约电能，在高压大容量应用中占主导地位。

4.2 注入式混合滤波

注入式 HAPF 将 APF 输出端通过注入支路（由电容

器及电抗器组成)连接到电网,使得有源部分不需要承受基波电压,从而降低直流侧电压等级以及开关损耗。注入支路对于基波具有高的阻抗而对于谐波却很小,起到引导谐波电流进入 APF 支路的作用。此结构非常适用于中高压配电网,可以较好地消除 5、7、11 这些低次谐波的同时还能提供无功支持。而在控制方案方面一般使用电压外环与电流内环闭环控制方式实现对直流电压稳定以及对电流跟踪的要求。

4.3 统一电能质量调节器中的谐波治理

统一电能质量调节器(UPQC)是由串联 APF 和并联 APF 构成,具有谐波电压消除以及谐波电流补偿作用,在串联部分对电源侧谐波进行抑制,在并联部分对负载侧谐波进行补偿,两者共同起作用可以使得 PCC 点处电压和电流均为正弦波。UPQC 是目前电能质量改善中功能最强大的一种装置,但是由于其控制难度大、造价昂贵,因此一般只用于对电能质量有较高要求场合如精密制造业、超算中心等。而在一般的供配电系统中,人们往往会采取简化混合滤波方式来满足使用需求。

5 谐波治理技术的工程应用选型原则

5.1 治理目标与标准

选择的主要依据是国家标准及行业规范。GB/T14549—1993 对不同等级电网谐波电压畸变率及各种谐波电流允许值做出规定,同时提出注入公共连接点处谐波电流符合要求;另外 IEEE519-2022 也有一定借鉴意义。实际应用时需结合供电容量、负载特性与并网需求确定总的谐波畸变率(一般小于 5%)、某些特定次谐波衰减倍数等;而对于一些对电能品质有较高要求的用户还需注意电压暂降、闪变等问题。

5.2 经济性与技术性综合评估

技术选择需要考虑初投资、运行维护费用、占地面积、可靠性和可扩展性等因素。无源滤波器成本最低,在谐波频谱确定并且负载稳定的情况下使用,但是需要定期检测其参数是否发生偏移;而 APF 有最优的响应速度,但是单台价格较高,适用于变动较大的负载,混合滤波在中等容量时性价比较高。另外还需要考虑设备损耗对于整个系统的效率的影响,以及冗余的设计和短路

保护等。宜用全生命周期成本(LCC)的方法来进行分析比较,把治理的效果、设备使用寿命以及能耗都作为评价标准。

5.3 不同电压等级下的策略差异

在低压(380V/660V)供配电系统中,由于其电压等级较低以及相关元器件较为完善等原因,因此 APF 和 SVG 使用频率较高,无功补偿兼滤波的电容器组一般设置 6%电抗率;而在中压(6kV~35kV)系统中受限于开关器件耐压与容量问题,APF 难以直接接入,一般采取注入式混合滤波或者无源滤波器,同时结合有载调压以及自动投切;对于高压(110kV 以上)谐波治理主要是采用 C 型或者 D 型阻尼滤波器并结合变压器移相以及多脉波整流等方式来减少谐波产生的。各类不同电压等级的治理方式都是遵循了“源头抑制为主、局部补偿为辅、整体协调优化”的原则。

6 结语

供配电系统谐波治理是多学科综合技术。本文剖析无源、有源及混合三类技术的原理与边界,强调其与无功补偿的协同设计。指出不存在普适最优解,需依据负荷特征等差异化选型。未来趋势呈智能化、模块化与高频化:AI 用于策略自适应优化,SiC 器件推动装置小型化与高频化,物联网实现全节点监控。伴随分布式能源普及,谐波传播呈现双向潮流及宽频带特征,对治理装置响应速度与鲁棒性要求更高。预计混合型与协同型方案将成为主流,标准化、即插即用模块将降低实施门槛,提升电能质量管控效能。

参考文献

- [1] 王兆安,刘进军.谐波抑制与无功补偿技术新进展[J].电力系统自动化,2022,46(8):1-10.
- [2] 张兴,张崇巍.PWM 整流器及其控制策略研究综述[J].中国电机工程学报,2021,41(22):7665-7678.
- [3] 陈坚,康勇.有源电力滤波器关键控制技术对比分析[J].电工技术学报,2023,38(5):1123-1135.
- [4] 罗安,吴传平.混合型有源滤波器的拓扑演化与设计方法[J].电力自动化设备,2022,42(3):1-9.