

Detection of Harmonic Pollution in Low-Voltage Distribution Systems and Parameter Optimization of Active Power Filters (APF)

Zuguang Jia

Tangshan Jidong Cement Sanyou Co., Ltd., Tangshan, Hebei, 063100, China

Abstract

With the continuous application of new energy power generation methods, the operation of low-voltage distribution systems has become increasingly complex, resulting in a gradual intensification of harmonic pollution in the power grid. As an important device for harmonic control, Active Power Filters (APF) are widely used in harmonic detection and grid-connection technologies. Based on the shortcomings of traditional harmonic pollution detection methods, this paper elaborates on the specific methods of APF in harmonic pollution detection. In the optimization of APF parameters, genetic algorithms are employed to optimize the control parameters of the filter. The research results indicate that the proposed parameter optimization scheme can not only enhance the harmonic suppression capability of the APF but also fully utilize its dynamic response characteristics.

Keywords

Low-voltage distribution system; harmonic pollution detection; active power filter; parameter optimization

低压配电系统中谐波污染的检测与有源电力滤波器 (APF) 的参数优化

贾祖光

唐山冀东水泥三友有限公司, 中国·河北 唐山 063100

摘要

在新能源发电方式不断应用的过程中, 低压配电系统的运行情况变得愈加复杂, 因此电网中的谐波污染也逐渐加重。有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)作为谐波治理的重要设备, 在谐波检测以及并网技术中有着广泛应用。本文基于传统谐波污染检测方法展现出的缺点, 详细阐述了APF在谐波污染检测中的具体方法。在APF参数优化中, 借助遗传算法, 针对滤波器控制参数进行了优化设计。研究结果表明本文提出的参数优化方案不仅可以提升APF的谐波抑制能力, 还可以充分发挥其动态响应特性。

关键词

低压配电系统; 谐波污染检测; 有源电力滤波器; 参数优化

1 引言

在我国电力电子技术高速发展的过程中, 非线性负载在低压配电系统中的应用比例不断提升, 谐波污染已经成为影响配电系统稳定性的重要因素。在配电系统中一旦出现谐波污染, 不仅会导致电力系统中电力设备出现异常损耗, 还会引起设备误动作和系统共振, 最终影响配电系统稳定性。而传统的谐波检测方法存在一定局限, 因此需要相关人员借助 APF 设备对谐波信号进行检测, 以实现谐波污染控制。

【作者简介】贾祖光(1980-), 男, 中国河北唐山人, 本科, 工程师, 从事水泥行业电气设备管理与技术研究。

2 APF 基本原理与类型

2.1 基本原理

有源电力滤波器(APF)包含两种基本的拓扑结构, 即串联式和并联式, 其中并联结构由于其工程上更为广泛的应用范围而成为主流的采用方案, 其系统结构原理框图如图1所示, 图中各物理量的定义如下: “ i_s ”表示电源输出电流, “ e_s ”代表交流供电电源。非线性负载是系统主要的谐波污染源, 还会引起较大的无功功率损耗。系统架构主要由两个功能模块形成: 补偿电流产生回路和谐波检测回路, 补偿电流产生模块包含三个关键的子单元: 功率主电路、电流跟踪控制单元以及驱动电路, 该模块的核心功能在于根据谐波检测电路发出的指令补偿电流信号, 经由功率级电路把

此信号转成实际的补偿电流，进而达成与负载电流中预定谐波分量的动态抵消，以产生符合电能质量要求的系统电流，谐波检测模块（又被称为指令电流运算单元）的主要职责在于精确地分离和检测谐波电流分量。主电路大多采取脉宽调制变流器架构，这种变流器具有整流与逆变双象限运行能力，由于两种工作模式之间并无根本性的结构差别，所以本文一致将其视为变流器拓扑^[1]。

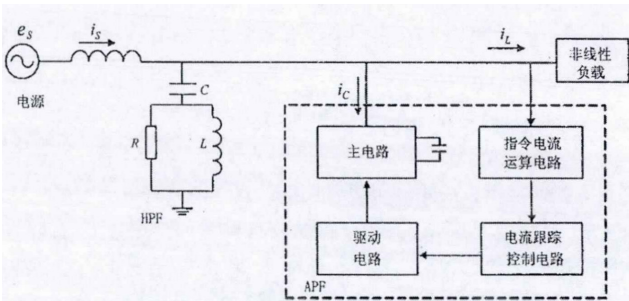


图 1 并联 APF 系统构成原理图

APF 的基本工作原理为基于补偿对象需求，通过电压、电力传感器进行实时检测，再借助指令电流运算电路进行计算，并通过有效的系统控制生成误差信号，进而得到相应的补偿电流指令信号，以此作为控制变流器的输入，同时借助脉宽调制策略生成开关量，进而产生与实际电流相位相反、大小相等的补偿电流，最终达到谐波补偿的目的。

2.2 APF 的基本类型

在 APF 设备发展中也出现了不同类型的有源电力滤波器，其工作原理不尽相同，分类方式也有所不同。从直流侧储能元件角度来看，可以将不同 APF 分为电流源型与电压源型。其中电流源型 APF 在实际应用中可以有效控制电流在短时间内的剧烈变化，但是由于电感存在一定电阻，所以会对电流的流速进行限制，进而造成电力损耗，因此在大容量系统中这类设备应用较少。而在电容值较大时两端电压的波动小，与电压源类似，可以通过对变流器输出电压进行控制实现电流补偿。这类设备价格低、工作效率高，适合在容量大的系统中应用，但是如果系统出现短路，设备就会出现电流贯通短路，会对电力系统造成较大危害^[2]。

从供电系统的角度出发，可以按照供电系统将其分为三相、单相 APF。单相 APF 主要用于小型工厂、医院等小功率单相系统的谐波抑制。单相负荷一般的供电系统为三相四线制，在这类系统中单相负载数量比较多，而且电流较大，所以出现了并联型 APF 方案。

3 传统谐波检测方法分析

对于 APF 来讲，谐波电流的检测十分重要，为了保障补偿电流的准确性，谐波检测的快速性、灵活性、准确性十分重要，因此人们在长时间实践中提出了诸多检测方法：1. 模拟滤波器。该检测方法有着拓扑结构及工作机理较为简单的突出特点，而且存在明显的经济性优势，可以有效地去除特

定固有频率的谐波分量，其技术原理是模拟信号处理核心理念：通过设置带通滤波器网络来获取负载电流里的基波分量，再把此基波分量同原本的负载电流执行代数减法运算，这样就得到了目标谐波电流分量。不过此方法存在固有的技术局限性，即当电网基波频率出现大幅偏离时，谐波分离过程会产生较大的误差；而且，当电路中关键元器件的参数由于温度漂移或者老化等因素而发生变化时，检测精度就会表现出很大的波动特征，并且这种方法不能做到对基波无功分量和谐波分量实施选择性的识别^[3]。2. 基于 Fryze 传统功率定义法。该检测方法按照平均功率理论框架形成核心算法原理，其技术实现必定要执行完整基波周期的数据积分运算才能够得到平均功率值，这实际上表明对于瞬时功率的动态响应流程而言很难避免会存在至少一个周期的时延，所以此方法在负载工况高频切换的暂态阶段以及对即时性需求很高的应用环境下有着明显不足，其基本运行机制可阐述为：

把待检测的电流信号分解成两个正交分量，一个是和电网电压同相位的基波有功部分，另一个被统称为广义无功电流分量，这样的数学分解方式直接造成该方法存在另一个重要漏洞：无法做到谐波电流分量与基波无功电流分量的选择性识别及单独检测。3. 基于快速傅里叶变换法。这种方法具有功能多、使用方便、检测精度高等优势，可以对电网频率进行自动跟踪，并完成谐波分量的提取。在谐波检测、频谱分析中有着广泛应用。但是这种方法对于相位、幅值、谐波信号频率的提取采用离散傅里叶变换方法，所以计算量较大，实用性不高。4. 基于 FBD 法。这种检测方法具有较高实时性，不会局限于三相电路，但是目前该方法的应用只处于理论研究阶段，并没有实际应用。

4 基于 APF 谐波检测方法

目前 APF 谐波检测算法主要分为频域与时域两种，其中时域算法主要有同步旋转坐标变换检测方法，包括 pqr、pq 检测方法，在频域算法中主要包含小波变换、傅里叶分解法、卡尔曼滤波器等。结合当前低压配电系统中谐波污染的检测需求，本文提出了基于 fryze 功率理论的 FBD 方法，以提升谐波检测成效。

4.1 FBD 方法分析

该检测方法以 Fryze 传统功率理论作为基本原理框架，其核心操作在于把负载电流信号分解成两个具有特定物理意义的分量，其中与供电电压波形完全同步的分量被严格定义为基波有功电流分量，剩下的所有分量则归为广义无功电流，该算法体系是以平均功率计算模型为基础建立起来的，所以要经过完整的基波周期的数据积分运算才能得到有效的平均功率值^[4]。

这种计算原理实质上表明，对于瞬时功率的动态检测流程而言，必定会存在至少一个基波周期这样的时间延迟情况，所以在负载工况出现高频波动的暂态阶段以及电能质量

控制需求极为迫切之时,此方法在实际操作当中有着很大的技术瓶颈,它的理论实现途径可以这样来描述:把待测量的电流分解成两个相互独立的部分,一个是和电压波形完全同相的有用功率分量,另一个则归为广义无功电流这个范围之中作为综合剩余部分。将系统电压矢量设置为 $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$, 电流矢量为 $\mathbf{i} = (i_1, i_2, \dots, i_m)^T$, 矢量各个元素为各个相应量的瞬时值,其等效电导、瞬时总压、瞬时功率可以按照公式 1 表示。

$$\begin{aligned} p_{\Sigma}(t) &= \langle \mathbf{i}, \mathbf{u} \rangle = \sum_{n=1}^m u_n i_n = \sum_{n=1}^m p_n(t) \\ \|\mathbf{u}\| &= \sqrt{\langle \mathbf{u}, \mathbf{u} \rangle} = \sqrt{\sum_{n=1}^m u_n^2} \\ G_p(t) &= \frac{p_{\Sigma}(t)}{\|\mathbf{u}\|^2} = \frac{\langle \mathbf{i}, \mathbf{u} \rangle}{\langle \mathbf{u}, \mathbf{u} \rangle} \end{aligned} \quad (1)$$

根据公式可知,无论系统的负载是否处于平衡状态,都可以将不同支路的等效电路电导看成相同的,这时就可以认为系统处于理想的负载平衡状态。其系统电流与功率电流会产生电流分量,瞬时功率相同。因此这种方法的本质就是投影变换。

4.2 FBD 方法

基于 Fryze 的时域分析法中功率的定义建立在平均功率之上,所以要对瞬时有功电流进行积分,需要对一个周期内的结果进行检测,之后再加上运算电流。因此这种方式延迟性较高。为了提升瞬时有功电流的实时性,需要对其进行改进。其基本思路是以对实际电路负载特性进行理想化建模为核心理论支撑,该方法假定系统能量转换过程全部集中在等效电子元件上,凭借此模型架构,可以对负载电流进行数学分解,从而系统探究各个电流分量的物理特性和技术意义。对于瞬时功率、电源端瞬时总功耗、等效电导参数、功率电流分量、零功率电流分量、等效线性电导参数以及线性功率电流分量等关键分量的性质进行讨论。为完善无功功率检测的理论基础,此方法新增了专门的定义框架,包含四个重要定义,即无功电流负载的无功等效电导特征参数、无功功率电流分量、无功等效线性电导参数以及线性无功功率电流分量,这些定义合起来形成检测无功功率电流的完备理论依据^[5]。

在负载端上设计合理的功率补偿装置拓扑结构之后,按照这个理论体系,可以做到对各种电流分量的动态获取以及独立控制,这样的技术路线给电力系统的谐波治理和无功补偿赋予了关键的理论支撑和执行手段,大幅优化了电能质量控制的即时性和准确性。

电流检测方法为在检测基波无功电流与谐波电流时可以断开电流基波有功,并对电源电压波形进行分析,得到谐波电流分量。在这种检测方式下,如果电压波形出现畸变,

也会对结果造成影响,因此可以引入锁相环技术,通过锁相环形成参考电压,保证与电源电压同相位,以此代替原有电压数值,避免因电压畸变出现的误差。在这种方式中并没有对电压的幅值进行确定,所以即使出现电源电压畸变,最终检测结果也可以保证精准。

5 APF 参数优化计算

直流电压的大小决定了 APF 的整体输出能力,以 A、B 两桥臂为例,在某一固定时刻, A 桥臂输出电流需要得到正的变化率,这时 a 相系统电压值处于正值状态,而 B 桥臂的输出电流要求得到负的变化率,并且 b 相系统电压为负值,这时要对电流进行计算,就可以将其写成公式 2:

$$\frac{(S_a - S_b)E - u_a - u_b}{L_S} = \frac{di_{Fa}}{dt} - \frac{di_{Fb}}{dt} \geq 0 \quad (2)$$

因此在 APF 参数优化中为了满足电流变化率要求,直流电压需要在不同相电压的取值满足上述公式需求。因此如果低压配电系统的电压有效值为 220V,直流电压的最小值需要设置在 539V。

在直流电容取值优化时,需要确保 APF 可以在正常工作状态下将直流电压限制在一定范围内,如公式 3 所示

$$\frac{\Delta u_{dc}}{E} = \frac{(u_{dc})_{\max} - (u_{dc})_{\min}}{E} \leq \beta \quad (3)$$

β 的取值在 1%-2% 之间,在实际计算中需要将流入直流电容的有功功率视为 0 进行计算,进而得到最终的电容取值范围。

6 结语

综上所述,为了进一步提升低压配电系统的运行稳定性,本文通过对现有谐波污染检测方法进行分析,提出了基于 Fryze 时域分析法的 FBD 检测方法,该方法不仅可以提升谐波检测效率,还可以避免 APF 受到电压畸变的影响。同时,本文结合实际应用中 APF 电流与电容设置需要,对其参数进行了优化。

参考文献

- [1] 汪敏,赵静,张健.谐波干扰抑制下的低压配电网母线电压自动控制系统[J].自动化技术与应用, 2024, 43(7):75-78.
- [2] 陈新.分布式光伏并网谐波对配电系统影响分析[J].电世界, 2024, 65(6):1-5.
- [3] 王华佳,张岩,尹书林,等.分布式光伏并网系统电压越限风险及谐波影响[J].电网与清洁能源, 2024, 40(3):128-138.
- [4] 王云峰,岳田.供配电系统中电力谐波与治理方法研究[J].电力设备管理, 2024(9):50-52.
- [5] 徐军岳,柳毅,桂家娥.基于不平衡补偿的低压配电网电能质量问题及治理对策研究[J].电气传动, 2024, 54(1):33-39.