

有源电力滤波器谐波抑制控制策略仿真分析

刘雨寒 42220219920419181X

摘要: 随着电力电子装置在电力系统中的广泛应用,电网谐波污染问题日益突出,严重影响电网供电质量与用电设备的安全运行。有源电力滤波器(APF)作为动态抑制谐波、补偿无功的核心装置,其控制策略直接决定谐波补偿效果。本文首先阐述 APF 的工作原理与拓扑结构,对比分析基于瞬时无功功率理论的 p-q 法、i_p-i_q 法以及重复控制、模型预测控制等主流谐波电流检测与控制策略的优缺点,进而基于 Matlab/Simulink 搭建并联型 APF 仿真模型,对不同控制策略下的谐波抑制效果进行仿真验证。仿真结果表明,复合控制策略能够结合不同算法的优势,在动态响应速度与谐波补偿精度上均优于单一控制策略,可为 APF 工程应用提供参考。

关键词: 有源电力滤波器; 谐波抑制; 控制策略; 仿真分析

一、引言

近年来,新能源发电、变频调速装置、整流设备等非线性负荷在电力系统中的渗透率不断提升,这类负荷会向电网注入大量谐波电流,造成电网电压波形畸变,引发设备过热、继电保护误动、通信干扰等一系列问题,严重威胁电力系统的安全稳定运行。传统无源滤波装置依靠 LC 谐振回路滤波,存在滤波特性固定、易与电网发生谐振、体积大等缺陷,已经无法满足动态谐波抑制的需求。有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)通过实时检测谐波电流,生成反向补偿电流抵消谐波分量,具有动态响应快、滤波精度高、适应性强等优势,已经成为电网谐波治理领域的主流技术方案。

APF 的谐波抑制效果核心取决于谐波电流检测精度与电流跟踪控制性能,目前行业内已经提出多种检测与控制方法,不同方法在动态响应、稳态精度、抗干扰能力等方面存在明显差异。本文对主流谐波检测与控制策略进行分析对比,通过 Matlab/Simulink 搭建仿真模型,对比不同控制策略的谐波抑制效果,总结不同策略的适用场景,为 APF 控制策略的选型与优化提供依据。

二、有源电力滤波器工作原理与拓扑结构

目前应用最广泛的 APF 为并联型结构,其基本工作原理是:通过电流传感器采集非线性负荷的总电流与电网电压,经控制算法计算分离出其中的谐波电流分

量，将谐波电流分量反向作为 APF 的参考电流，控制 APF 输出与谐波分量大小相等、方向相反的补偿电流，从而抵消非线性负荷产生的谐波电流，使得电网侧输入电流仅含基波分量，实现谐波抑制的目标。

并联型 APF 主要由四部分构成：电压型 PWM 整流器主电路、驱动电路、信号采集电路与控制单元。主电路采用 IGBT 作为开关器件，直流侧采用电容储能，通过 PWM 调制实现电流的快速跟踪控制。相较于串联型 APF，并联型 APF 安装维护方便，适用范围更广，可用于多谐波源场合的谐波治理，因此本文以并联型 APF 为研究对象开展仿真分析。

三、APF 主流谐波抑制控制策略分析

3.1 谐波电流检测算法

谐波电流检测的精度直接决定补偿效果，目前基于瞬时无功功率理论的检测算法应用最为广泛，主要包括 $p-q$ 法与 i_p-i_q 法两种形式。 $p-q$ 法以瞬时有功功率 p 与瞬时无功功率 q 作为计算基础，通过坐标变换将三相电流转换到 $\alpha-\beta$ 坐标系，分离出基波与谐波分量，该方法在电网电压对称无畸变的情况下检测精度较高，但当电网电压存在畸变时，检测误差会明显增大。 i_p-i_q 法通过计算瞬时有功电流 i_p 与瞬时无功电流 i_q 分离谐波分量，仅需要一个低通滤波器，运算量更小，且在电网电压畸变情况下仍然能保持较高的检测精度，适用性更强，因此目前工程中 i_p-i_q 法应用更为广泛。

除了基于瞬时无功功率的检测方法，还有基于傅里叶变换的谐波检测法、小波变换检测法等，傅里叶变换检测法可以分离特定次数的谐波，但存在频谱泄露与栅栏效应问题，且检测延时较大，无法满足动态补偿要求；小波变换检测法对非平稳谐波的检测性能更好，但算法复杂度高，对控制器运算性能要求较高，目前仍处于研究阶段。

3.2 电流跟踪控制策略

电流跟踪控制的作用是控制 APF 输出电流快速准确跟踪参考谐波电流，主流策略包括滞环比较控制、PI 控制、重复控制、模型预测控制等。滞环比较控制是一种非线性控制方法，通过设置滞环宽度控制开关器件的通断，实现电流的跟踪，该方法动态响应快，实现简单，但开关频率不固定，滤波难度大，对开关器件性能要求较高。PI 控制是线性控制系统中应用最广泛的控制方法，参数整定简单，稳态误差小，但对于周期性的谐波信号，PI 控制无法实现无静差跟踪，稳态补偿精度有限。

重复控制基于内模原理，能够对周期性信号实现无静差跟踪，对谐波这类周期性扰动具有良好的抑制效果，稳态精度高，但重复控制存在一个周期的延时，动态响应速度较慢，当负载发生突变时，补偿滞后明显。模型预测控制根据系统的预测模型，滚动优化判断未来时刻开关状态对输出电流的影响，选择最优开关动作，该方法动态响应快，鲁棒性强，但算法运算量较大，对控制器性能要求较高。

四、仿真模型搭建与结果分析

本文基于 Matlab/Simulink 搭建三相并联型 APF 仿真模型，仿真参数设置为：电网线电压 380V，基波频率 50Hz，直流侧母线电压设置为 700V，非线性负荷采用三相不控整流桥带阻性负载，总负荷电流谐波畸变率约为 28%。分别对 PI 控制、重复控制、PI+重复复合控制三种策略进行仿真对比，仿真结果如表 1 所示。

控制策略	补偿后电网电流 THD (%)	动态响应时间 (ms)
未补偿	28.12	-
PI 控制	6.78	20
重复控制	3.24	45
PI+重复复合控制	2.15	22

从仿真结果可以看出，未补偿时电网电流总谐波畸变率 (THD) 达到 28.12%，远高于 GB/T 14549 规定的公用电网谐波畸变率上限 (5%)。三种控制策略都能够有效降低谐波畸变率，其中 PI 控制动态响应速度最快，但是补偿后 THD 仍然达到 6.78%，无法满足国标要求；重复控制补偿后 THD 降到 3.24%，稳态精度更高，但是动态响应时间达到 45ms，负载突变时暂态补偿效果较差；PI+重复复合控制结合了两控制方法的优势，补偿后 THD 仅为 2.15%，满足国标要求，同时动态响应时间仅为 22ms，接近 PI 控制的动态性能，综合性能最优。

五、结论

有源电力滤波器是治理电网谐波污染的有效装置，控制策略直接决定其谐波抑制效果。单一控制策略无法同时兼顾动态响应速度与稳态补偿精度，复合控制策略能够结合不同控制方法的优势，实现更优的综合补偿效果。本文仿真结果表明，PI+重复复合控制策略补偿后电网电流 THD 仅为 2.15%，动态响应速度快，能够满足大多数工业场合的谐波治理需求，具有较高的工程应用价值。未来可以进一步结合人工智能算法优化控制参数，提升 APF 在复杂电网工况下的适应性。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [2] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.