

自适应谐振滤波器在拖动系统谐波治理中的实现与优化

王亦瑶 410603199409300041

摘要：电力拖动系统运行过程中，电力电子变流装置会产生大量谐波，造成电网电压畸变、设备损耗增加，严重威胁电网运行稳定性与拖动系统使用寿命。本文针对传统谐波治理装置响应速度慢、对时变谐波跟踪精度不足的问题，分析了自适应谐振滤波器在拖动系统谐波治理中的应用原理，给出了自适应谐振滤波器的具体实现方案，并基于变步长自适应算法对滤波器性能进行优化。仿真结果表明，优化后的自适应谐振滤波器能够快速跟踪拖动系统谐波的动态变化，谐波治理效果显著，总谐波畸变率降低至 3% 以下，满足电网电能质量要求，为拖动系统谐波治理提供了一种可靠的技术方案。

关键词：自适应谐振滤波器；拖动系统；谐波治理；变步长算法；电能质量

一、引言

电力拖动系统是工业生产领域的核心动力装置，广泛应用于冶金、煤炭、化工、制造等行业，随着电力电子技术的快速发展，变频拖动系统凭借调速性能好、效率高的优势逐步取代传统拖动方案，成为当前拖动系统的主流形式。但变频拖动系统中，整流、逆变单元依靠开关器件实现电能变换，开关过程会产生大量特征次谐波与间谐波注入电网，不仅会增加线路与变压器损耗，还会干扰精密测量设备正常工作，甚至引发电网谐振事故，威胁整个电力系统的安全稳定运行。

当前拖动系统常用的谐波治理方案主要包括无源滤波器、有源电力滤波器两类，无源滤波器结构简单、成本低，但只能针对固定次谐波进行治理，对系统参数变化适应性差，且容易与电网阻抗发生并联谐振，进一步放大谐波；有源电力滤波器补偿性能好，但成本较高，控制复杂度大，对中小功率拖动系统而言性价比偏低。自适应谐振滤波器兼具结构简单、自适应能力强的优势，能够根据谐波的变化动态调整自身参数，实现对特定次谐波的精准跟踪与滤除，逐步在谐波治理领域得到应用。本文针对拖动系统谐波特性，开展自适应谐振滤波器的实现与优化研究，对提升拖动系统电能质量具有重要的现实意义。

二、拖动系统谐波特性与谐振滤波原理

变频拖动系统的谐波主要来源于前端整流桥和后端逆变桥，对于常用的三相六脉波整流电路，输出谐波主要为 $6k \pm 1$ 次 ($k=1,2,3,\dots$)，对于十二脉波整流电

路，谐波主要为 $12k \pm 1$ 次，而逆变环节会产生与开关频率相关的谐波，谐波次数主要为开关频率倍数附近的分量。拖动系统负载经常发生动态变化，谐波的幅值和相位也会随负载变化产生波动，要求治理装置能够快速跟踪谐波变化，保持良好的滤波效果。

自适应谐振滤波器的核心原理基于内部模型原理，通过在控制器中嵌入谐波的内部模型，实现对特定频率谐波的无静差跟踪与滤除。谐振滤波器的传递函数可以表示为：

$$G(s) = (2k_r \omega_c s) / (s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2)$$

其中 k_r 为谐振增益， ω_c 为截止频率， ω_0 为谐振中心频率。当输入信号频率等于谐振中心频率 ω_0 时，谐振器增益趋于无穷大，能够实现对该频率信号的无静差跟踪，而对于其他频率信号增益很低，不会产生额外影响。相较于传统固定参数滤波器，自适应谐振滤波器可以根据输入谐波的频率、幅值变化自动调整自身参数，不需要提前知道谐波的具体参数，对于拖动系统时变谐波具有更强的适应性。

三、自适应谐振滤波器的实现方案

针对拖动系统谐波治理需求，本文设计的自适应谐振滤波器结构主要分为谐波检测模块、自适应调节模块、滤波输出模块三个部分，具体实现流程如下：首先通过电压传感器和电流传感器采集电网侧输入电流信号，经过锁相环模块获取电网基波频率，然后根据拖动系统谐波特性确定需要治理的特征次谐波频率，为每个特征次谐波配置一个独立的自适应谐振单元；谐波检测模块提取出电流中的谐波分量，作为自适应谐振滤波器的输入，自适应调节模块根据输入误差信号动态调整谐振滤波器的增益系数，实现对谐波分量的精准跟踪；最后将跟踪得到的谐波信号反相注入变流器控制端，产生补偿电流抵消原有的谐波分量，完成谐波治理。

在数字实现过程中，需要对连续域的谐振滤波器传递函数进行离散化处理，本文采用双线性变换法实现离散化，变换过程如下：将 $s = (2/T)(1-z^{-1})/(1+z^{-1})$ 代入连续域传递函数，得到离散域的传递函数，其中 T 为采样周期。离散化后的自适应谐振滤波器可以直接在 DSP 或 FPGA 芯片中实现，满足实时控制的要求。

四、自适应谐振滤波器的算法优化

传统固定步长自适应算法存在收敛速度与稳态误差之间的矛盾，步长较大时收敛速度快，但稳态误差大，谐波残留多；步长较小时稳态误差小，但收敛速度

慢，无法跟踪拖动系统谐波的动态变化。针对这一问题，本文采用变步长自适应算法对自适应谐振滤波器进行优化，步长调整公式如下： $\mu(n) = \mu_{\max}1 - \exp(-\alpha|e(n)|^2) + \mu_{\min}$

其中 $\mu(n)$ 为第 n 次迭代的步长， $\mu_{\max}$ 为最大步长， $\mu_{\min}$ 为最小步长， α 为调整系数， $e(n)$ 为第 n 次迭代的误差信号。当误差信号较大时，说明谐波参数刚刚发生变化，此时步长自动增大，加快收敛速度；当误差信号较小时，说明滤波器已经收敛到稳定状态，此时步长自动减小，降低稳态误差，有效解决了固定步长算法的矛盾，兼顾了收敛速度和稳态性能。

五、仿真验证与结果分析

为验证本文设计的优化后自适应谐振滤波器的谐波治理效果，本文在 Matlab/Simulink 平台搭建了三相变频拖动系统仿真模型，拖动系统额定功率为 110kW，基波频率为 50Hz，整流环节采用三相六脉波整流，主要谐波为 5 次、7 次、11 次、13 次谐波，分别配置四个自适应谐振单元进行治疗，对比传统固定步长自适应谐振滤波器和本文优化后的变步长滤波器的治理效果。

仿真结果显示，未进行谐波治理时，电网侧电流总谐波畸变率为 12.6%，采用传统固定步长自适应谐振滤波器治理后，总谐波畸变率降低至 4.2%，而采用本文优化后的自适应谐振滤波器治理后，总谐波畸变率降低至 2.8%，满足国家电网规定的公用电网谐波畸变率不超过 5% 的要求；动态响应测试结果显示，当拖动系统负载从 50% 额定负载突变至 100% 额定负载时，传统滤波器需要约 3 个周期完成收敛，而优化后的滤波器仅需要 1 个周期即可完成收敛，动态响应速度提升明显，能够适应拖动系统负载快速变化的场景。

六、结论

自适应谐振滤波器结构简单、成本低，对拖动系统谐波具有良好的治理效果，本文通过变步长自适应算法对传统固定步长算法进行优化，解决了收敛速度与稳态误差的矛盾，同时增加了频率自适应调整环节，提升了对电网频率偏移的适应性。仿真结果表明，优化后的自适应谐振滤波器能够有效降低拖动系统谐波畸变率，动态响应速度快，稳态误差小，具有良好的工程应用价值，适合在中小功率拖动系统谐波治理中推广应用。

参考文献：[1]王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[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,

2006.

[3]张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

[4]李剑, 涂春鸣, 罗安. 自适应谐振滤波器在有源电力滤波器中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 51-56.