基于三次谐波注入的三单相星接 PFC 整流器直流侧二次纹波抑制方法研究

牟骏玮　黄　洁　史超洋　闫　森　冯华珍

中国矿业大学（北京）机械与电气工程学院 北京 100083

【摘　要】：针对大功率单向三相整流器直流母线存在的二次电压纹波问题，本文以三单相星接 PFC 整流器为研究对象，对三次谐波注入的纹波抑制方法进行研究。传统方案通常依靠增大直流侧电解电容来减小电压波动，但电容容量的增加会带来体积、成本及使用寿命等方面的问题。为此，本文尝试通过调整 PWM 调制信号改善直流侧电压质量，在原有基波调制波中加入三次零序谐波，利用三相 Y 型连接的拓扑特点调整各桥臂的工作状态。控制过程中，基波调制分量由直流电压闭环调节，三次谐波分量则固定为三角载波幅值的 0.59 倍，两者叠加后形成最终调制波。该方法不需要增加额外的功率硬件。通过 MATLAB/Simulink 仿真，对加入三次谐波前后的直流电压进行比较。结果表明，在直流电压给定值为 500V 时，未注入三次谐波的电压波动范围为 480.2V～518.4V，注入后缩小至 488.1V～511.4V，电压峰峰值从 38.2V 降至 23.3V，降幅约为 39%。仿真结果说明，该方法能够在当前设定条件下减小直流侧电压波动，为三单相星接 PFC 整流器的纹波抑制提供一种可行的控制思路。

【关键词】：三单相星接 PFC 整流器；三次谐波注入；二次纹波抑制；脉宽调制

DOI:10.12417/2705-0998.26.14.022

1 绪论

1.1 研究背景与意义

随着电力电子技术的不断发展，整流器在新能源发电、电机驱动以及工业直流供电等领域得到了广泛应用。作为交流与直流之间的能量转换环节，整流器的输出质量会直接影响后级设备的运行状态。因此，在实现电能转换的同时，如何减小直流侧电压波动，也是整流器控制中需要解决的问题之一。

三单相星接 PFC 整流器在工作过程中，各单相整流单元的输入瞬时功率都具有一定的周期性变化。当交流侧电压和电流均为正弦波时，输入功率除了平均分量外，还包含一个频率为电网频率两倍的脉动分量。由于负载消耗的功率通常不会随之发生相同幅度的变化，这部分功率差额需要由直流侧支撑电容进行缓冲，电容在充放电过程中便会引起母线电压波动。在 50Hz 工频条件下，该波动主要表现为 100Hz 的二次电压纹波。

直流侧电压纹波过大，不仅会影响直流供电质量，还可能对后级变换器及电机驱动系统的运行产生不利影响。因此，在不明显增加电路复杂度的情况下减小直流侧二次电压纹波，对提高整流器的运行性能具有一定意义。

1.2 传统抑制方法的局限性

目前，直流侧二次电压纹波通常采用电容滤波的方式进行抑制。通过在直流母线上配置较大容量的电解电容，可以缓冲输入功率与负载功率之间的差额，从而减小母线电压的变化幅度。不过，这种方法在实际应用中也存在一些不足。

（1）体积与成本问题：为了达到较低的电压纹波要求，通常需要配置较大容量的电解电容。随着电容容量增加，相关器件的采购成本和安装空间也会随之增加。

（2）可靠性问题：电解电容的工作性能容易受到温度、纹波电流及使用时间等因素的影响。长期运行后，电解液可能逐渐损耗，器件参数也可能发生变化，从而影响设备的稳定运行。

（3）动态性能限制：电容滤波主要依靠固定容量实现能量缓冲。当负载或输入电网发生变化时，单纯依靠电容本身难以主动调整纹波抑制过程，因此还需要结合控制策略改善系统的动态性能。

作者简介：

牟骏玮，男，2004 年生，中国矿业大学（北京）电气工程及其自动化专业本科生，主要研究方向为高功率多电平变换器及其建模与控制。

黄洁，女，2005 年生，中国矿业大学（北京）电气工程及其自动化专业本科生，主要研究方向是高功率多电平变换器及其建模与控制。

史超洋，男，2005 年生，中国矿业大学（北京）电气工程及其自动化专业本科生，主要研究方向为高功率多电平变换器及其建模与控制。

闫森，男，2004 年生，中国矿业大学（北京）电气工程及其自动化专业本科生，主要研究方向为高功率多电平变换器及其建模与控制。

冯华珍，女，2004 年生，中国矿业大学（北京）电气工程及其自动化专业本科生，主要研究方向是高功率多电平变换器及其建模与控制。

基金项目：中国矿业大学(北京)大学生创新训练项目资助(202513026)。

除无源滤波外，也有研究采用 DC-DC 变换器或有源储能支路补偿脉动功率。这类方案能够提供额外的调节能力，但同时会引入新的开关器件和储能元件，增加电路设计难度，并带来额外损耗。因此，如何在不增加额外功率硬件的前提下改善直流侧电压波动，仍具有进一步研究的价值。

1.3 谐波注入调制技术的研究进展

除了从电路结构入手，改变 PWM 调制方式也是改善变换器运行性能的一种途径。通过在原有调制信号中加入适当的谐波分量，可以改变开关器件的调制过程，从而影响变换器的电压、电流及瞬时功率特征。

在三相变换器中，三次谐波属于零序分量。在满足相应拓扑连接和调制条件时，向三相调制波中加入同相位的三次谐波，可以在不直接改变线电压相应公共分量的情况下调整各相调制信号。因此，三次谐波注入为功率调节和电压纹波抑制提供了新的研究方向。

已有相关研究对谐波注入在变换器调制和运行性能改善方面的应用进行了探讨。不过，对于不同拓扑结构，谐波注入所产生的具体效果并不完全相同，需要结合实际电路进行分析。

基于上述背景，本文选取三单相星接 PFC 整流器作为研究对象，将三次谐波注入与原有 PWM 调制方式相结合，重点考察该方法对直流侧二次电压纹波的影响，并通过仿真结果分析其可行性。

2 三单相星接 PFC 整流器拓扑与三次谐波注入原理

2.1 整流器拓扑结构

本文研究的三单相星接 PFC 整流器由三套单相 PFC 整流桥臂组成，交流侧采用星形（Y 型）连接，并设置公共交流中性点。各相直流侧分别配置支撑电容和阻性负载，其直流侧连接关系按照所建立的仿真电路进行设置。

该拓扑由多个单相整流单元构成，控制系统既需要实现输入电流整形和直流电压调节，也需要考虑各单元之间的电气连接对运行状态的影响。与增加辅助功率变换电路的方式相比，本文采用的调制方法主要通过改变 PWM 参考信号实现，不需要额外增加专门用于纹波补偿的功率支路。

对于这种结构，三次谐波注入的作用与交流中性点约束、直流侧连接方式以及各相调制信号的设置有关。因此，在分析纹波抑制机理时，需要结合实际拓扑和控制方式，判断调制波变化对各相功率及直流侧电压的影响。

2.2 直流侧二次纹波产生机理

单相 PFC 整流器通常将输入电压和输入电流控制为同频、近似同相的正弦波。虽然这种控制方式有利于提高功率因数，但并不能使输入瞬时功率保持恒定。由于电压与电流的乘积包含二倍频分量，输入功率会随工频周期发生变化。

在负载功率相对稳定的情况下，输入功率的周期性变化会使直流侧电容承担相应的能量差额。当输入功率大于负载消耗功率时，部分能量储存在电容中；当输入功率小于负载消耗功率时，电容释放能量以维持负载供电。随着这一过程不断重复，直流母线电压便会出现周期性波动。

对于三单相星接 PFC 整流器，各单相整流单元均可能存在上述现象，因此需要进一步研究调制方式对各单元功率变化及直流侧纹波的影响。通过调整调制信号，如果能够改变相关功率脉动的分布或减小流入直流侧电容的脉动功率，就有可能降低母线电压的波动幅度。。

2.3 三次谐波注入调制策略

为实现直流侧二次纹波抑制，本文向基波调制波中注入三次零序谐波分量，复合调制波可表示为：

$$m(t)=m1\sin(\omega t)+m3\sin(\omega t)$$

式中，m_1 为基波调制分量幅值，m_3 为三次谐波注入幅值。复合调制波与三角载波进行比较后，生成相应的 PWM 驱动信号。

在该控制方案中，基波调制分量和三次谐波分量采用不同的设置方式。基波分量由直流电压闭环控制器调节，会随着系统运行状态发生变化；三次谐波分量则按照预先设定的比例加入调制波，其幅值不直接参与直流电压闭环调节。本文将三次谐波幅值设置为三角载波幅值的 0.59 倍。

三次谐波注入的主要思路，是通过改变调制波的构成，影响各相桥臂的开关状态和瞬时功率。对于满足相应条件的三相调制系统，三次零序谐波不会直接改变线电压中的相应公共分量，但会改变各相调制信号相对于载波的关系。

需要注意的是，零序谐波注入能否产生预期的功率调节效果，还取决于具体的电路拓扑和直流侧连接方式。因此，不能仅根据三次谐波的零序特性，就直接认定各相二次纹波功率一定会发生相应转移，仍需通过实际电路分析和仿真结果进行验证。

在本文的仿真方案中，三次谐波注入幅值取三角载波幅值的 0.59 倍，并通过对比注入前后的直流电压波形考察其影响。该参数是当前仿真条件下采用的设定值，其是否为最优值，还需要通过不同注入幅值下的对比试验进一步确定。

与增加辅助功率变换电路的方案相比，该方法主要通过修改 PWM 调制信号实现，不需要增加额外的功率硬件。但在实际应用中，还需要考虑调制范围、输入电流质量以及开关损耗等因素。

3 仿真与实验分析

3.1 仿真模型建立

本文采用 MATLAB/Simulink 搭建三单相星接 PFC 整流器仿真模型。模型主要包括交流输入电源、单相 PFC 整流桥臂、直流侧支撑电容、阻性负载以及直流电压闭环控制和 PWM 调制模块。

仿真中，交流输入频率设置为 50Hz，直流电压给定值为 500V。基波调制分量由直流电压闭环自动调节，在此基础上，通过调制模块向参考信号中加入三次谐波分量，其幅值为三角载波幅值的 0.59 倍。

为比较三次谐波注入的作用，分别设置未注入和注入三次谐波两种运行工况。在对比过程中，应保持其余电路参数和控制参数一致，主要观察直流侧电压波动范围的变化。通过对两种工况下的电压极值进行比较，可以初步判断该调制方法对直流侧二次纹波的影响。

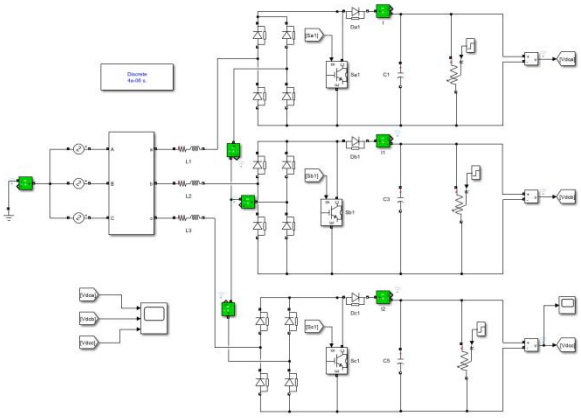

图 1 主电路拓扑

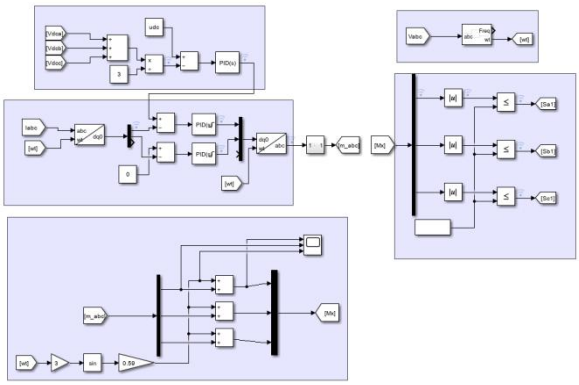

图 2 三次谐波注入控制策略

3.2 仿真与实验结果分析

3.2.1 直流侧二次纹波抑制效果

在未注入三次谐波的情况下，仿真得到的直流侧电压最低值为 480.2V，最高值为 518.4V，电压峰峰值为 38.2V。从电压波形可以看出，直流母线存在较明显的周期性波动。

加入幅值为三角载波 0.59 倍的三次谐波后，直流侧电压最低值升至 488.1V，最高值降至 511.4V，电压峰峰值减小为 23.3V。与未注入工况相比，注入后的电压波动范围明显收窄。

按照电压峰峰值的变化计算，纹波抑制率约为 39%。这表明，在当前仿真参数和运行条件下，加入三次谐波后，直流侧电压的最大波动幅度有所降低。

从调制原理来看，加入三次谐波会改变复合调制波的形状，进而影响 PWM 开关信号的生成过程。由此可能改变各相桥臂的瞬时功率特征，并对直流侧电容的充放电过程产生影响。不过，仅凭直流电压波动范围的变化，还不足以完全说明其内部功率变化机制。若要进一步验证这一机理，还需要结合输入电流、直流侧电容电流及瞬时功率波形开展分析。

此外，本文采用电压峰峰值作为纹波评价指标，该指标能够直观反映电压最大值与最小值之间的差异。为了更全面地分析控制效果，后续还可以在相同稳态时间范围内比较直流电压平均值和纹波有效值，从不同角度评价三次谐波注入的实际作用。

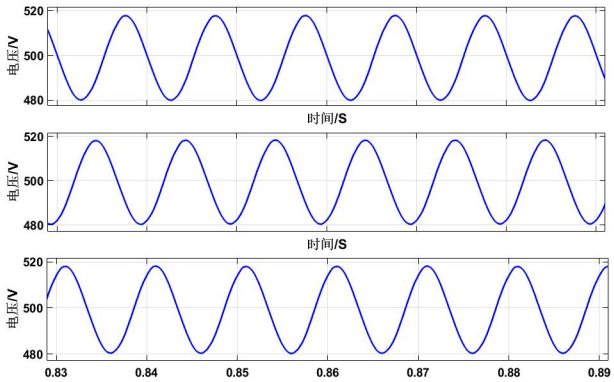

图 3 未注入三次谐波时直流侧电压波形

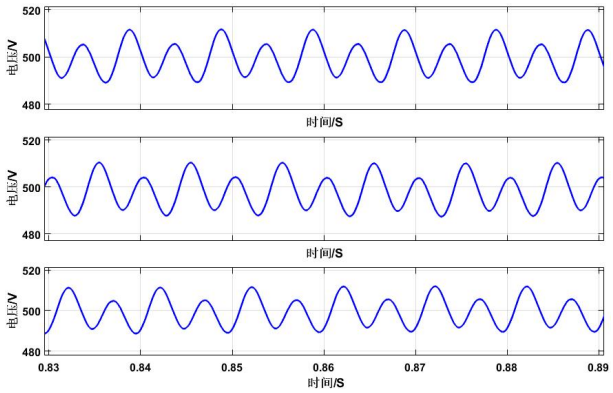

图 4 注入三次谐波时直流侧电压波形

3.2.2 电容经济性评估

传统无源滤波方案主要通过增大直流侧电容容量来减小

电压波动，但较大容量的电解电容通常会占用更多空间，并增加器件成本。本文采用的三次谐波注入方法则从调制控制角度入手，在不额外增加功率补偿支路的情况下改善直流侧电压波动。

从仿真结果来看，加入三次谐波后，直流侧电压峰峰值有所下降。这说明通过调整控制信号，可能在一定程度上减轻直流侧的纹波问题，为后续优化电容选型提供新的思路。

不过，电容容量能否进一步减小，还需要结合系统允许的电压纹波范围、负载变化情况及动态响应要求进行判断。同时，三次谐波注入对输入电流畸变、开关损耗和整体效率的影响也需要进一步研究。因此，现阶段更适合将该方法视为一种具有应用潜力的纹波抑制手段，其经济性和可靠性优势仍有待结合具体设计和实验结果进行评估。

4 结论与展望

4.1 研究结论

本文针对三单相星接 PFC 整流器直流侧二次电压纹波问题，研究了三次谐波注入调制方法，并通过 MATLAB/Simulink 仿真对其效果进行了分析。根据现有理论分析和仿真结果，可以得到以下结论：

单相 PFC 整流器的输入瞬时功率包含二倍频脉动分量。当输入功率与负载消耗功率不一致时，直流侧电容需要承担相应的能量变化，从而引起母线电压波动。

本文采用基波调制分量与三次谐波分量相叠加的控制方式。其中，基波调制分量由直流电压闭环进行调节，三次谐波分量按照三角载波幅值的 0.59 倍设置。该方案主要通过调整调制信号实现，不需要额外增加用于纹波补偿的功率硬件。

在直流电压给定值为 500V 的仿真条件下，未注入三次谐波时，直流侧电压波动范围为 480.2V～518.4V，峰峰值为 38.2V；注入后，电压波动范围缩小至 488.1V～511.4V，峰峰值降至 23.3V，降幅约为 39%。仿真结果表明，该方法在当前工况下能够减小直流侧电压波动。

三次谐波注入为直流侧纹波抑制提供了一种基于调制控制的实现思路。其对电容容量、设备体积及运行可靠性的实际影响，还需要结合进一步的仿真分析和硬件实验进行验证。

4.2 未来研究方向

本文主要对三次谐波注入方法进行了初步分析，后续仍有一些问题需要进一步研究。

（1）加深研究程度：目前主要考察了给定仿真条件下的电压纹波变化。后续可以改变三次谐波注入幅值，对比不同参数下的电压峰峰值，并研究负载变化和电网扰动对抑制效果的影响，从而进一步明确该方法的适用范围。

（2）控制方案优化：本文采用固定幅值的三次谐波注入方式。后续可以结合直流电压闭环控制，根据负载和电压波动情况调整注入幅值，同时考察该方法对输入电流质量、开关损耗及动态响应的影响。

（3）工程化验证：目前的结果主要来自仿真模型，尚需通过实际硬件平台进一步验证。后续可以搭建实验样机，测量不同运行条件下的直流电压和输入电流，并将实验结果与仿真数据进行比较，以分析实际器件参数和控制延迟对纹波抑制效果的影响。

参考文献：

[1] R.Barzegarkhoo,M.Forouzesh,S.S.Lee,F.Blaabjerg,and Y.P.Siwakoti,“Switched-capacitor multilevel inverters:A comprehensive review,”IEEE Trans.Power Electron.,vol.37,no.9,pp.11209–11243,Sep.2022.

[2] Debnath,J.Qin,B.Bahrani,M.Saeedifard,and P.Barbosa,“Operation,control,and applications of the modular multilevel converter:Areview,”IEEE Trans.Power Electron.,vol.30,no.1,pp.37–53,Jan.2015.

[3] E.Babaei,C.Buccella,and M.Saeedifard,“Recent advances inmultilevel inverters and their applications—Part I,”IEEE Trans.Ind.Electron.,vol.63,no.11,pp.7145–7147,Nov.2016.

[4] E.Babaei,C.Buccella,and M.Saeedifard,“Recent advances in multilevel inverters and their applications—Part II,”IEEE Trans.Ind.Electron.,vol.63,no.12,pp.7777–7779,Dec.2016.