光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250815002

基于三电平功率半导体拓扑的变换器谐波抑制策略

糜　松*，冯鸿亮，管生胜
（无锡广盈集团有限公司，江苏 无锡 214171）

摘　要： 电力电子变换器作为负载与电网之间的核心接口，其输出谐波水平直接关系到设备的安全运行和电网的供电可靠性。通过对常用电流控制方法的谐波抑制效果进行深入分析，提出一种改进型准比例谐振（PR）电流控制策略。该策略通过构建精确的准PR控制器数学模型，实现对电流谐波的有效抑制。仿真和半实物平台的验证结果表明，所提谐波抑制策略能够显著降低电流谐波含量，提升电力电子变换器的整体性能，为电力系统的稳定运行提供了有力保障。

关键词： 三电平逆变器；准比例谐振控制；谐波抑制；电力电子变换器
中图分类号： TM46；TN715　**文章编号：** 1001－5868(2025)06－1048－10

Harmonic Suppression Strategy for Converters Based on Three-Level Power Semiconductor Topology

MI Song, FENG Hongliang, GUAN Shengsheng
(**Wuxi Guangying Group Co., Ltd., Wuxi 214171, CHN**)

Abstract: The output harmonic level of a power electronic converter, which is the core interface between the load and a grid, directly influences the safe operation of the equipment and power-supply reliability of the grid. In this study, an improved quasi-proportional resonance (PR)-based current-control strategy is proposed based on a detailed and systematic analysis of the harmonic suppression effects of commonly used current-control methods. This strategy involves the construction of an accurate mathematical model of a quasi-PR controller to effectively suppress the current harmonics. Simulation and semi-physical platform verification results show that the proposed harmonic suppression strategy can significantly reduce the current harmonic level, improve the overall performance of the power electronic converter, and ensure stable operation of the power system.

Key words: three-level inverter; quasi-proportional resonance control; harmonic suppression; power electronic converter

0　引言

关于单相三电平逆变器的谐波抑制方法，国内外学者展开了大量研究。这些方法主要分为两类：一类是主动谐波抑制[1]，通过对逆变器自身的控制减少输出电能谐波含量；另一类是被动谐波抑制[2]，通过逆变器外接有源滤波或无源滤波装置，降低其输出电能谐波含量。Ruthardt等[3]提出一种将实测数据联合Norton模型的方法，模拟注入谐波电流后对系统的影响，再通过实验结果进行谐波分析。

在主动谐波抑制方面，谷鑫等[4]采用比例谐振控制器作为电流内环，该控制器通过提高特定频率点处的幅值增益，对网侧电流实现无稳态误差跟

收稿日期：2025－08－15.
基金项目：无锡广盈集团有限公司2024年省管产业科技项目（JC2024049）.
*通信作者：糜　松

踪，然而传统的比例谐振控制器在谐振点频率处带宽小，其稳定性和抗干扰性较差。苑国锋等[5-6]提出准比例谐振控制器来减少电流谐波，该控制器增加了特定谐振频率下的带宽，还降低了系统对电路参数以及网压频率波动时的敏感性，提高了系统的抗干扰能力。

在被动谐波抑制方面，Kulkarni等[7]通过分析网侧电流谐波的产生机理，再通过KCL及KVL电路分析谐波特性，提出一种在牵引变压器绕组上连接新型无源滤波器的方法以实现谐波抑制。殷嘉棋[8]针对车辆与电网耦合仿真模型中遇到的高次谐波问题，提出采用二阶阻尼高通滤波器和阻波器来抑制高次谐波，并对两种方法的谐波抑制效果进行比较分析。此外，袁义生等[9]针对动车组变换器自身存在的低频谐波影响的问题，通过评估预测多变量控制来抑制低频谐波，并通过RT-LAB半实物平台进行实验验证。

当谐振现象发生时，逆变器自身系统所带的谐波频率和供电系统固有的谐振频率相一致，会导致谐振叠加变大。为解决此问题，兰梓冉等[10]提出一种基于重复控制和状态反馈的三相逆变器最优预见控制方法，并结合硬件平台的实验验证，实现了谐波谐振的有效抑制。

本文以单相有源中点钳位（Active Neutral Point Clamped，ANPC）三电平逆变器为研究对象，针对其电流谐波较大的问题，提出并应用了一种改进准比例谐振（PR）电流谐波抑制控制策略。通过仿真和实验验证，结果表明所提控制策略在提升谐波抑制效果方面具有良好的有效性与可靠性。

1　电流内环改进控制策略

一般的电流环控制方法为保证控制系统的动态响应特性，通常采用PI控制器。该控制器通过将输入的直流信号进行比例积分运算后，再输出进行计算，以实现系统的零误差稳态控制[11]。然而，由于系统往往在输出信号中含有交流分量，常用PI控制器无法对输入信号进行谐波抑制。因此，本文提出一种改进型准PR电流谐波抑制控制策略，旨在有效抑制系统谐波[12]。

1.1　PR控制机理

PR控制器在S域的表达式为：

$$C_{\mathrm{PR}}(s)=K_P+\frac{K_r s}{s^2+\omega_r^2}=K_P\frac{s^2+\frac{K_r}{K_P}s+\omega_r^2}{s^2+\omega_r^2} \quad (1)$$

式中，K_P代表PR控制器的比例系数，K_r代表PR控制器的谐振系数，ω_r代表特定的谐振角频率。

由于单相ANPC三电平逆变器输出电流通常含有很多奇次谐波，如3次、5次、7次、9次、11次等，这些奇次谐波的存在会影响系统的性能和稳定性。为有效抑制这些奇次谐波并改善系统性能，采用了具有谐波补偿功能的并联比例谐振控制策略。该策略通过针对性地补偿各个奇次谐波，来实现对逆变器输出电流中不同次谐波的有效抑制。并联PR控制器的设计表达式为：

$$C_{\mathrm{PR}}(s)=K_P+\frac{2K_{r1}s}{s^2+\omega_0^2}+\sum_{h=3,5,7,9,11}\frac{K_{rh}s}{s^2+(h\omega_0)^2} \quad (2)$$

式中，K_{rh}表示针对第h次谐波补偿PR控制器部分的谐振控制系数。通过对公式（2）分析可知，具备谐波补偿功能的并联PR控制器的幅频和相频特性可以通过单一PR控制器的传递函数来表达。

图1表示在相同的谐振系数条件下，设有与未设谐波补偿的控制器的波特图比较。在此图示中，带有谐波补偿功能的并联PR控制器在指定的谐波频率处展现出显著的增益提升，这使得该控制器能够对交流信号实现快速且精确的无稳态偏差控制。

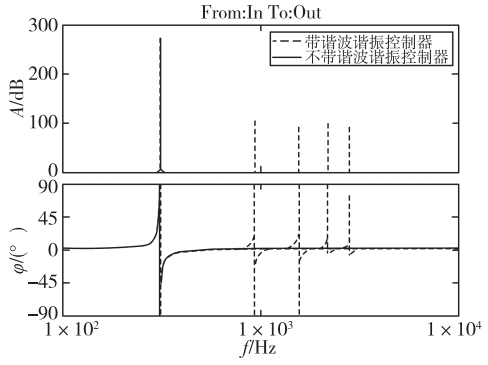


图1　带谐波补偿控制器与无谐波补偿器的波特图

PR控制器存在一个固有的缺点，即在谐波谐振频率处其带宽过窄。这导致当检测到频率波动时，谐波频率的变化幅度较大，甚至超过基波频率，从而影响系统的稳定性。因此，为了达到抑制谐波失谐的要求，PR控制器往往需要设置较高的谐振频率，但这会降低控制系统的抗干扰性。同时，由于带宽过窄，PR控制器的性能受到限制。

根据传递函数原理分析，PR控制器在谐振频率附近理论上应具有无穷增益，但是在实际运用中的控制系统很难实现增益无穷。因此，本文提出一种可以通过函数拓宽带宽的改进型PR控制器即准PR控制器，研究发现其更符合实际工程应用。

从数学函数来说，准PR控制器采用低通滤波器来替换传统PR控制器中的理想积分环节。这种方式不仅增强了控制系统的鲁棒性，还提升了其对干扰的抵抗能力。低通滤波器的传递函数表达式为：

$$H(s)=\frac{1}{1+s/\omega_c} \tag{3}$$

式中，ω_c为所提低通滤波器的截止频率，结合公式(1)和(2)，推导出准PR控制器传递函数：

$$C_{\mathrm{PR}}^{*}(s)=K_P+\frac{2\omega_c s}{s^2+2\omega_c s+\omega_0^2}K_r \tag{4}$$

从上述公式中可得，准PR控制器组成的并联谐波补偿器式为：

$$C_{\mathrm{PR}}^{*}(s)=K_P+\frac{2\omega_c s}{s^2+2\omega_c s+\omega_0^2}K_r+\sum_{h=3,5,7}\frac{2\omega_c s}{s^2+2\omega_c s+(h\omega_0)^2}K_{rh} \tag{5}$$

如图2所示，准PR控制器通过扩展其频率带宽，在牺牲一部分谐振频率附近增益的情况下，显著提高了系统控制的稳定性[13]。经过改进后，谐波谐振控制器的带宽在特定谐振点附近得以拓宽，但这也导致增益有所降低。因此，在实际运用场景中，准PR控制器需要综合考虑其带宽与增益的效果，以确保在满足系统稳定性的同时也达到谐波抑制的目的。

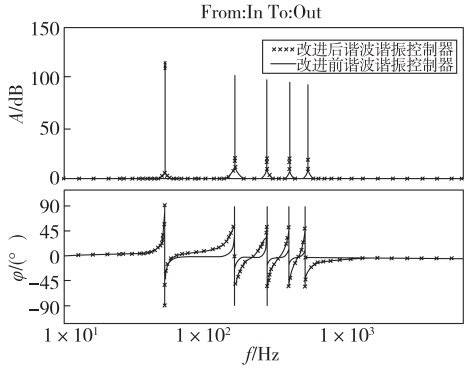


图2 准PR控制器与理想PR控制器波特图对比

1.2 PR控制谐波抑制性能分析

当将谐波补偿谐振控制加入电流环控制中时，可将并联谐波补偿控制器的表达式代入公式(5)。考虑到外部信号干扰的影响，单相三电平ANPC逆变器电流环控制系统输入及输出函数如下式：

$$i_s(s)=\frac{C_i(s)G_{iPWM}(s)G_{pi}(s)}{1+C_i(s)G_{iPWM}(s)G_{pi}(s)}i_s^{*}(s)+\frac{G_{pi}(s)}{1+C_i(s)G_{iPWM}(s)G_{pi}(s)}U_s(s) \tag{6}$$

由公式(6)可知，当控制系统在谐振频率上的增益趋向无限大时，系统能够实现无稳态误差的控制效果，进而精确追踪电流的预设值。这是因为在谐振频率处，公式(6)中分子与分母同时趋向无限大，使得该公式第一项的系数达到1，确保了无稳态误差。同时，该公式的第二项系数趋向于0，这有助于有效减少电流中的谐波成分，提升系统整体性能。

当PR控制器引入电流环控制时，将$S=j\omega$代入其传递函数，ω为特定谐振点处频率，PR控制器的增益如下式：

$$\left|C_{\mathrm{PR}}(s)\right|_{s=j\Delta}=\sqrt{K_P^2+\left[\frac{2K_r\omega_r}{-(\omega_r)^2+(\omega_r)^2}\right]^2}\to\infty \tag{7}$$

由于PR控制器在谐振点附近的增益趋向于无穷大，理论上可以实现任意低次频率谐波的无稳态误差控制。因此，当系统输入电流给定值不包含谐波分量时，反馈信号由于交流采样的原因，通常会包含一定的谐波分量。给定值与反馈值进行计算作差后输入控制模块，经过各个调节器的叠加影响，谐波畸变可能逐渐增大。但是当含有谐波分量的误差信号进入谐振控制器之后，并联式谐波谐振PR控制器将幅值通过特定谐波补偿使得谐振频率处增益变大，从而迅速减小误差信号。最终，控制系统能够跟踪无谐波分量的电流参考值，实现有效的谐波抑制，并优化电流波形。

1.3 PR电流环控制器建模

PR控制器的控制参数选择对系统的稳定性和精确度具有决定性影响，每个控制参数都旨在实现特定的谐波抑制效果。特别是为了扩宽控制器在选定谐振频率附近的带宽，需要精确设置准PR控制器的截止频率ω_c。截止频率ω_c不仅会影响控制器的增益，还会导致谐振点的带宽变化。公式(8)表示准PR控制器的谐振部分：

$$C_{\mathrm{PR}}^{*}(s)=\frac{2K_r\omega_c s}{s^2+2\omega_c s+\omega_0^2}\overset{s=j\omega}{\longrightarrow}C_R^{*}(j\omega)=\frac{2K_r\omega_c j\omega}{(j\omega)^2+2\omega_c j\omega+\omega_0^2}=\frac{K_r}{\left(1+j\left(\omega^2-\omega_0^2\right)\right)/2\omega_c\omega} \tag{8}$$

由公式(8)可知，$\left|C_R^{*}(j\omega)\right|=K_r/\sqrt{2}$ 时，相对的两个频率的差就是带宽。

令 $|(\omega^2-\omega_0^2)/2\omega_c\omega|=1$，计算出谐振点带宽 ω_c/π。为保证准 PR 控制器在一定的频率偏差下仍然可以保持良好的稳定性，基波频率点位置的带宽应设置为 50±0.5 Hz 的范围波动。

由于 K_P 和 K_r 决定控制器的增益大小和相位，这两个参数的设定需兼顾系统的动态和稳定性能。在实际应用中，应在保证充分稳定裕度和动态性能的基础上，对控制器参数进行综合考量并多次调整优化。经过反复试验和分析，最终选择 $K_P=2$，$K_r=55$，并设定准 PR 控制器构成的并联式谐波补偿器的参数为：$K_{r_3}=30$，$K_{r_5}=35$，$K_{r_7}=40$，$\omega_0=314$。在 Matlab/Simulink 仿真内搭建准 PR 控制器模型，图 3 为改进型准 PR 控制器结构图。

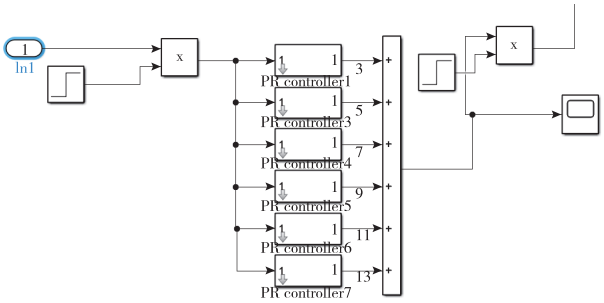


图 3　改进型准 PR 控制器仿真模块

1.4　仿真分析

图 4 是面向便携式电源应用的单相 ANPC 三电平逆变器，其整个主回路拓扑如图所示。整个系统分为前级直流部分和后级逆变部分，前级电池释放能量经过 Buckboost 电路设计，能够保证满足后级逆变部分直流的输入；后级为单相 ANPC 三电平逆变器。

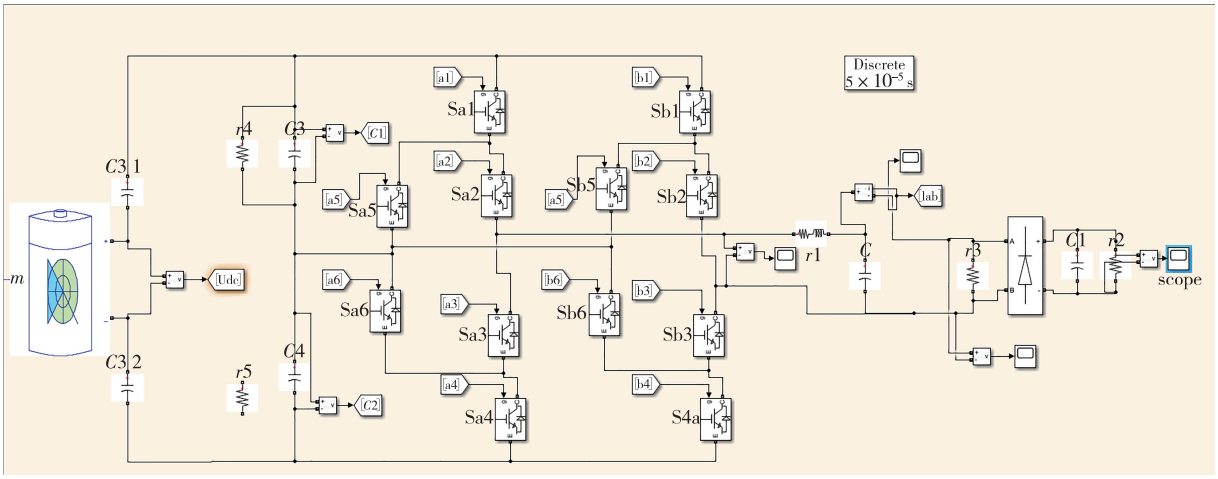


图 4　单相 ANPC 三电平逆变器主回路

设置仿真电池直流输入 400 V，母线电容容值 $C1=C2=560\ \mu F$；输出端 LCL 滤波电路滤波电容容值为 5 μF，交流侧电感 $L1=4$ mH 以及 $L2=0.5$ mH 工频电感；负载端为非线性负载，负载电阻为 30 Ω，负载电感 LR 为 2 mH，调制波频率为 50 Hz，载波频率为 5 kHz，调制度 m 为 0.8。

由图 5 和图 6 波形对比，瞬时电流控制下电流各次谐波含量较 PR 电流控制下更大，可以在波峰波谷上明显看出经过准 PR 谐振控制后电流波形畸变减少，波形也更接近正弦。

此外，由图 7 和图 8 对比可知，瞬时电流控制下电流总谐波畸变率（THD）为 4.96%，3 次、5 次、7 次、9 次等奇次谐波含量较大；而采用准 PR 电流控制下电流 THD 为 2.54%，经过 Matlab FFT 分析发现，奇次谐波抑制效果比较明显，说明 PR 电流控制相比瞬时电流控制谐波抑制效果更加显著。

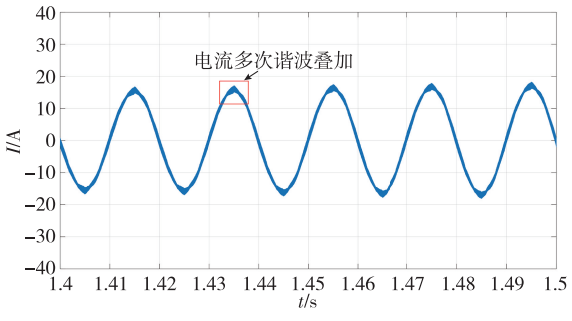


图 5　瞬时电流控制下电流波形

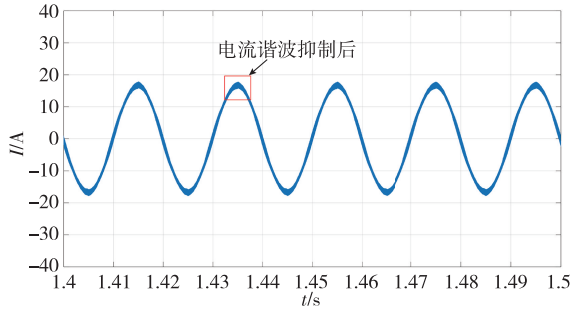


图6 准PR电流控制下电流波形

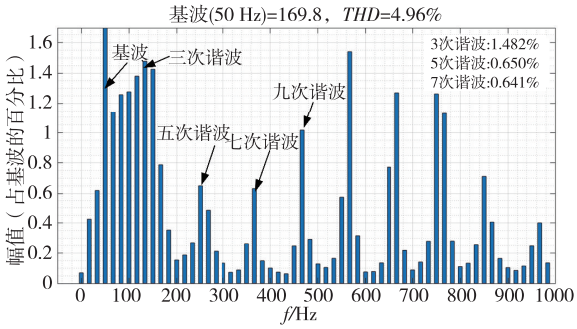


图7 瞬时电流控制下THD分析

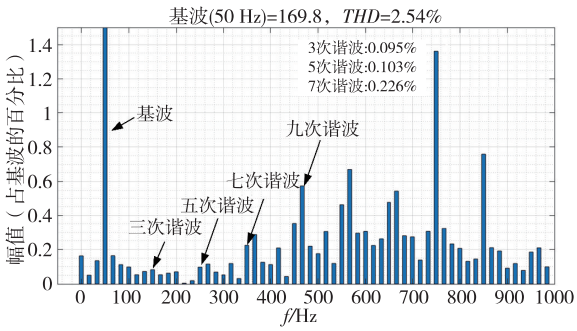


图8 准PR比例谐振控制THD分析

因此，采用准PR控制电流环对系统电流谐波有较好的抑制效果。对于交流侧电流的奇次谐波，如3次、5次、7次、9次和11次等，准PR控制器表现出良好的抑制效果，其中对低次谐波（3次、5次、7次）的抑制最为显著。这一特性使得准PR控制在实际工程应用中得到更为广泛的采用。

表1对比分析了两种电流控制下3次、5次、7次的谐波含量。结果显示，准PR电流控制下的电流总谐波率小于瞬态电流控制方法，尤其在低次谐波3次、5次、7次谐波上表现出更为显著的抑制效果，证明该方法对逆变器电流谐波抑制有良好的可行性。

表1 不同控制策略下电流奇次谐波大小

不同控制策略	3次谐波/%	5次谐波/%	7次谐波/%	总谐波率/%
瞬态电流控制	1.482	0.65	0.641	4.96
准PR电流控制	0.095	0.103	0.226	2.54

2 系统硬件及软件设计

单相ANPC三电平逆变器半实物实验硬件平台主要包括DSP控制器、示波器、PLECS半实物仿真机（RT BOX3）、上位机四部分组成。

使用瑞士Plexim GmbH公司开发的系统级电力电子仿真软件PLECS。半实物仿真平台由PLECS的RT BOX3仿真机、DSP控制器、示波器和上位机组成，如图9所示。RT BOX3仿真机主要用于搭建主回路物理模型，能够模拟电力电子功率回路的实时运行，并将电压、电流等电气传感器信号反馈给控制器。控制器利用RT BOX3输出的模拟AD采样，并结合控制程序再给RT BOX3输入PWM调制信号，最终进行半实物仿真实验。

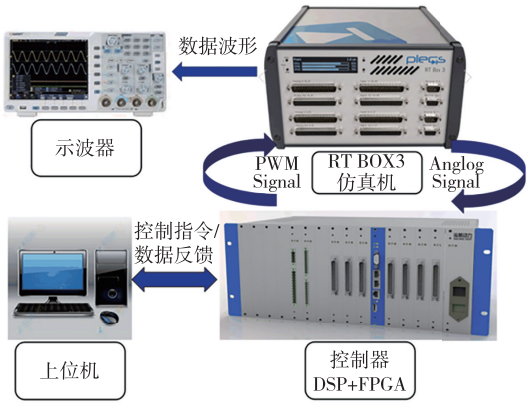


图9 半实物系统组成图

半实物系统还包括由南京泓帆动力技术有限公司研发的RCP5420控制器，该控制器基于C2000核心提供面向仿真机直连的RCP型式构造，方便进行算法的半实物测试和验证。

具体实验模型分为两部分：主电路部分和控制算法部分。其中，主电路部分需要在PLECS软件中搭建如图10所示的主回路模型。如图11为半实物系统控制逻辑框图。

2.1 控制软件设计

单相ANPC三电平逆变器系统的软件编程部分主要涉及数字信号处理器（DSP）的主控程序、中断处理程序以及与场可编程门阵列（FPGA）相关的程序。

FPGA与DSP之间的通信协同工作如图12所示，当检测到故障时能够迅速中断输出脉冲，从而保护系统[14]。

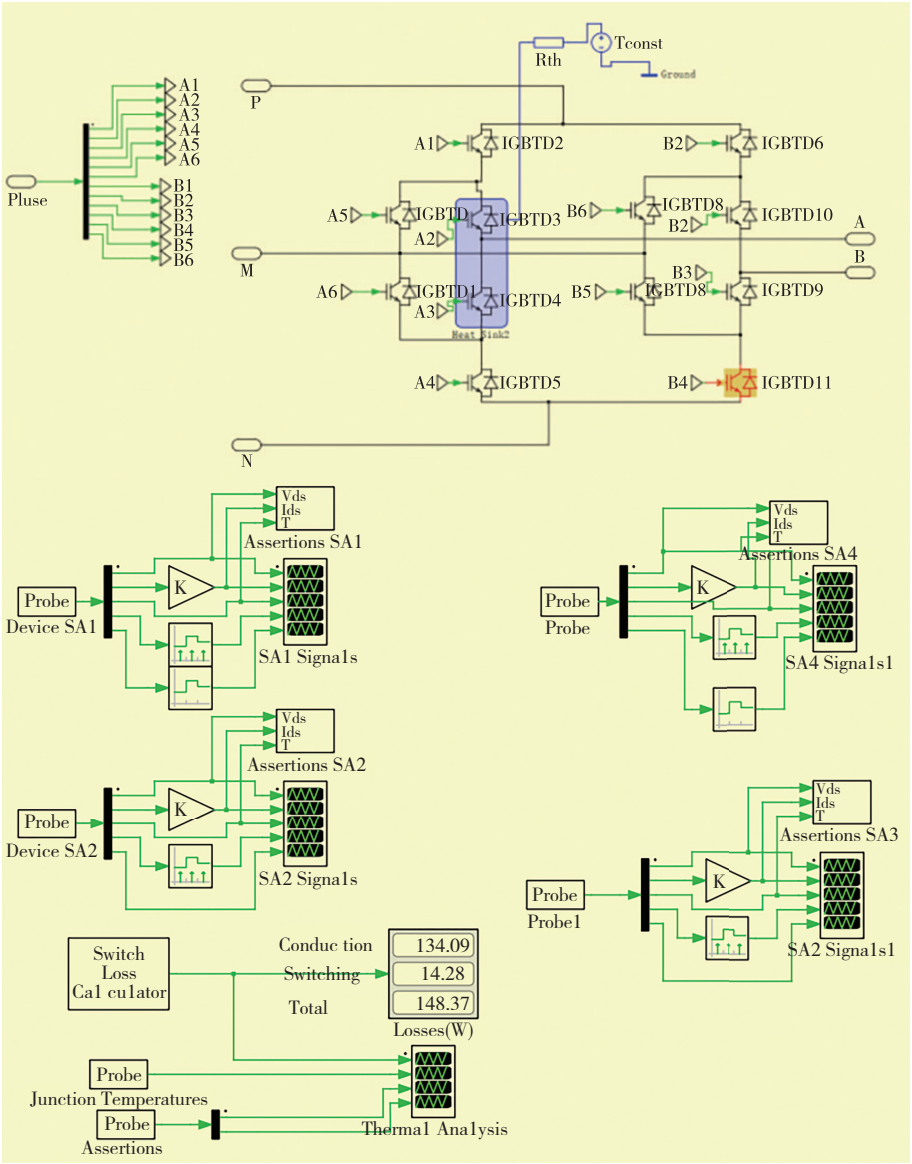


图 10　PLECS 软件主回路搭建

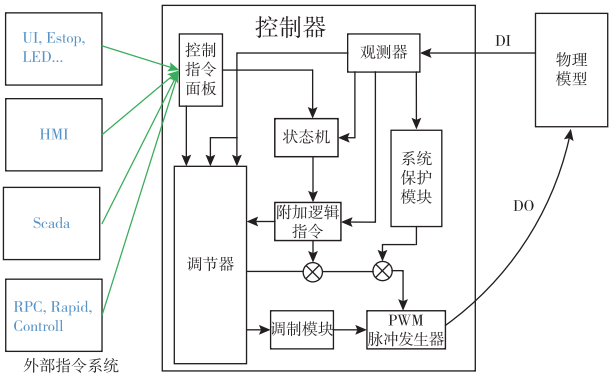


图 11　半实物仿真系统逻辑图

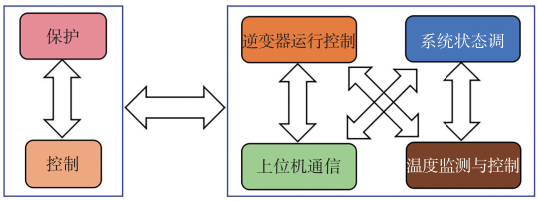


图 12　DSP＋FPGA 系统整体软件框图

图 13 为 DSP 程序的流程图，描绘了系统启动的过程。该过程从系统初始化开始，涵盖系统时钟、看门狗定时器等设置。随后，程序会对中断控制寄存器（PIE 控制寄存器）和中断向量寄存器进行配置，并初始化和使能中断函数。在接收到启动命令之后，程序将配置外部中断，并进入一个循环状态，等待中断信号的到来以触发中断服务子程序。中断服务子程序的主要任务是处理 FPGA 发送的采样数据，并实施电流谐波抑制控制算法等核心控制程序，同时计算并更新占空比。

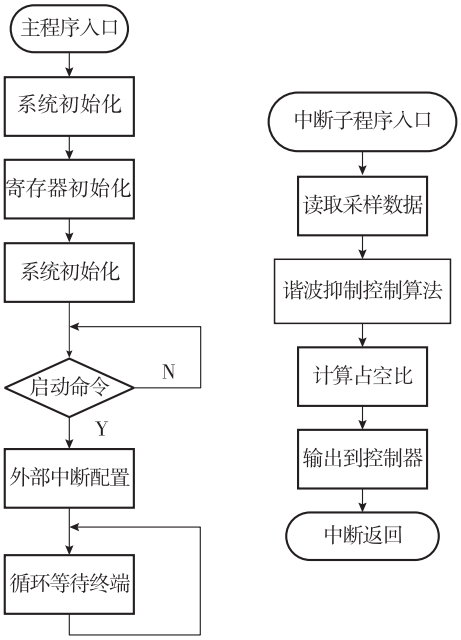


图 13 DSP 程序流程图

2.2 实物实验平台

本文主要研究面向单相 ANPC 三电平逆变器的谐波抑制，控制策略均侧重于逆变器研究，因此实物实验的主要目的是验证分析逆变器本身性能稳定性。

所搭建的实物实验平台实物图如图 14 所示。该实验平台中的单相 ANPC 三电平逆变器系统的功率等级为 5 kW，电池模拟器输出的直流电压等级为 400 V，逆变器输出线电压 220 V。该实验平台主要由控制器、单相 ANPC 三电平逆变器、LCL 滤波箱、电压电流采样箱、继电器、示波器和上位机七部分组成。主要在此实物实验平台上验证本文所提出的控制策略，实验参数设置参照仿真数值，通过对比验证其可行性。

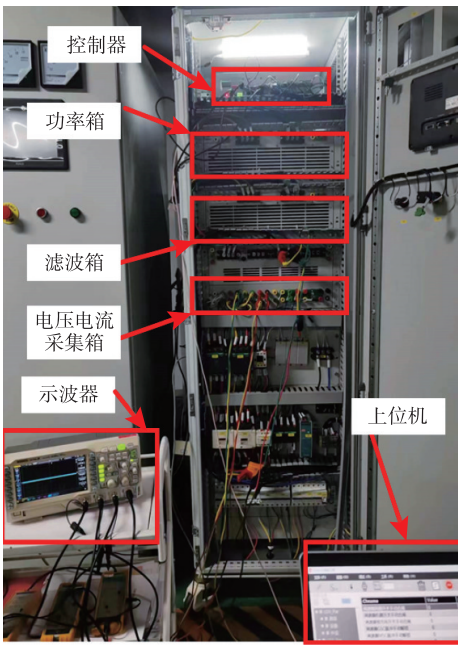


图 14 实物实验平台

单相 ANPC 三电平逆变器功率硬件实物如图 15 所示。控制器下发指令给驱动板，驱动板控制桥臂的功率器件开关切换等。功率组件箱采用插板式，功率底板即插即用，一块功率底板相当于一个桥臂，底板底部有 P，O，N，OUT 和 IN 五个端口。因为单相逆变器拓扑只有两相桥臂，所以实验使用两块功率底板。

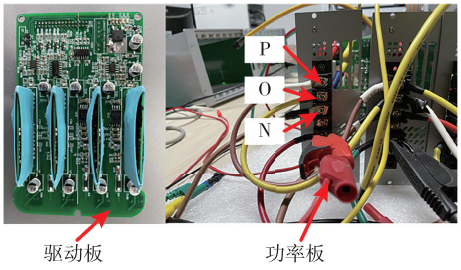


图 15 单相 ANPC 三电平逆变器功率组件实物图

2.2.1 功率器件计算与选型

选用英飞凌 IGBT EasyPACK 模块，该模块结构电路可作为单相 ANPC 三电平逆变器中一相桥臂，如图 16 所示。该模块最大标定参数：集电极-发射极电压 V_{CES}=950 V；集电极电流 I_{CN}=600 A；连续集电极直流电流 I_{CDC}=310 A；集电极重复峰值电流 I_{CRM}=800 A；栅极-发射极峰值电压 V_{GES}=±20 V。

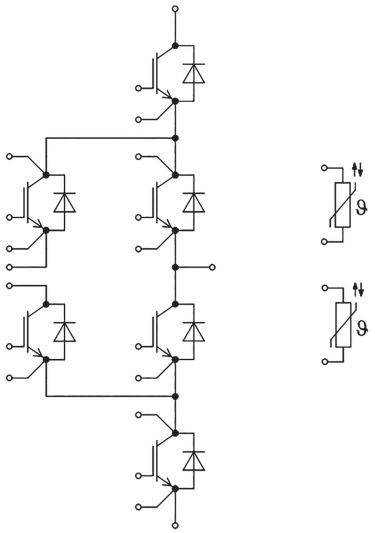


图 16 IGBT 模块结构图

功率器件的选型主要需要考虑其电压电流是否满足系统额定并超过10%。首先，功率器件电流处于集电极安全阈值内，功率器件所承受最大电流满足：

$$I_{max}=2\sqrt{2}\,I_{ac} \tag{9}$$

其次，功率器件的电压选型主要考虑开断尖峰是否处于安全区域内，其应该处于集电极与发射极之间，各管的电压极值满足：

$$V_{max}=\sqrt{2}\,U_{ac\,max} \tag{10}$$

在本设计中，输入直流电压设定为400 V。鉴于三电平拓扑的特性，所选器件的电压承受能力应为输入电压的一半，即200 V。然而，考虑到实际工程系统可能遇到的故障或紧急情况，为确保系统的安全和可靠性，器件的选型需预留足够的安全裕度[15]。因此，所选器件的额定耐压值被设定在750～1 200 V范围内，旨在提高整个系统在极端条件下的稳定性和可靠性。

2.2.2　直流端上下电容计算与选型

直流端电容选型至关重要，其决定了中点电压的平衡性，具有稳压和滤波作用。从原理上来看，容值越大其滤波和稳压效果越好，但根据工程实际考虑，电容体积以及成本也应考虑在内。上下电容的计算式为：

$$C_{c1/c2}=\frac{I_{dc\,max}}{2\omega V_{0max}} \tag{11}$$

式中，V_{0max}为中点电压偏差的极值，$I_{dc\,max}$为中点电流偏差的极值，ω为中点电压偏差角速度。

由上式可得：

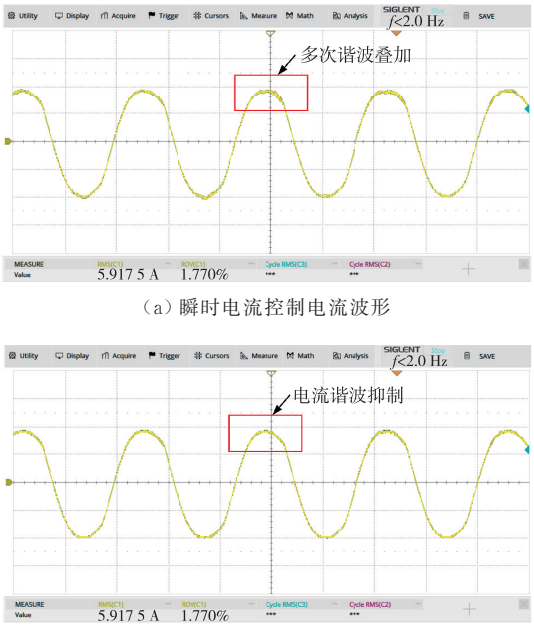
$$I_{dc\,max}=\frac{\sqrt{2}\,P}{3V\cos\varphi} \tag{12}$$

式中，P代表逆变器输出功率，$\cos\varphi$则为逆变器输出功率因数。

在正常运行条件下，上下电容承受的最大电压值为220 V。然而，考虑到系统设计中的安全裕量，以及中点电流中可能包含的3次、5次、7次等谐波电流的影响，所选择的上下电容参数为240 V/560 μF。

3　电流谐波抑制实验

采用同样的实验参数进行电流谐波抑制验证，对比准PR电流控制器方法，进行实验如图17所示。



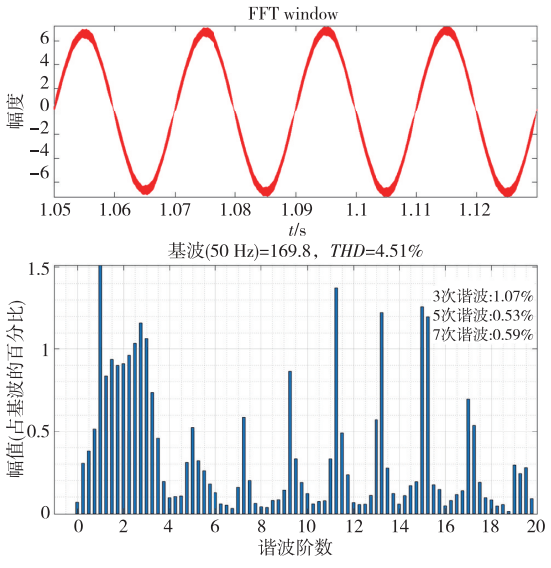
（a）瞬时电流控制电流波形

（b）准PR电流控制电流波形

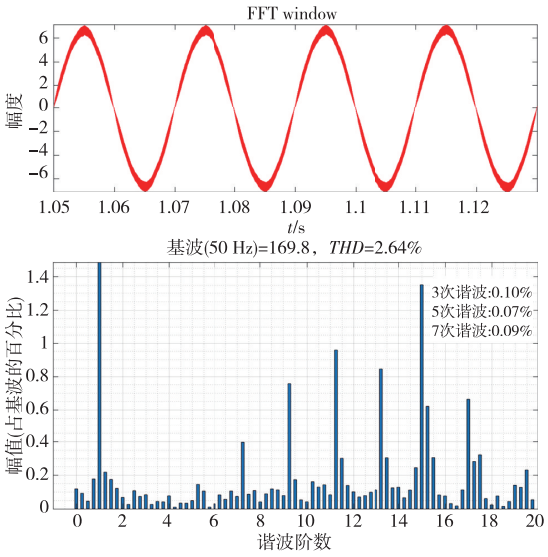
图17　输出电流波形对比

从图17所示的实际采集电流波形可以看出，准PR电流控制电流波形更接近正弦，且谐波引起的振荡更少。然而，由于实验波形受到多种外界干扰因素的影响，例如示波器电流探头精度、示波器本身通道精度以及非线性负载热阻发生变化等，存在误差较大的情况，实验波形无法做到精准验证。尽管如此，通过THD数据分析进行对比，也能直观验证算法的可靠性与有效性。

通过THD分析电流谐波数据，能够更直观地得到实验结果，电流谐波傅里叶分析如图18所示。



（a）瞬态电流控制下电流THD分析

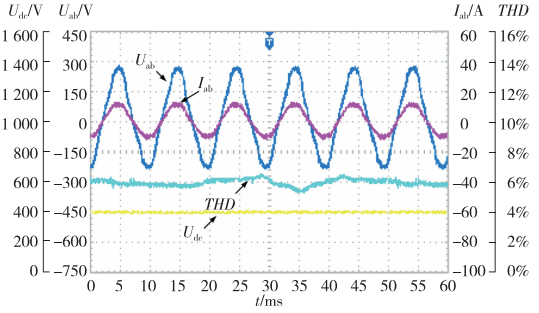


（b）准PR电流控制下电流THD分析

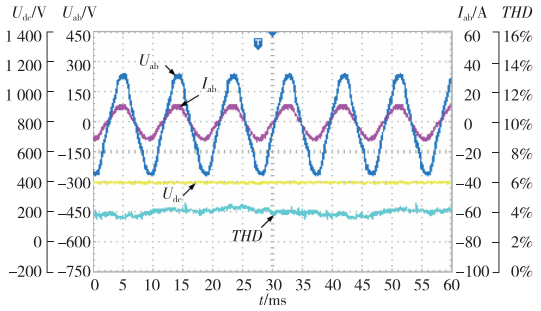
图18 两种控制方法下谐波THD分析

实验结果表明，逆变器输出电流波形的畸变率得到改善，电流波形更接近正弦波形。从THD分析数据来看，与瞬时电流控制方法相比，其交流侧电流THD下降到2.54%，符合便携式电源交流输出标准。其中，3次、5次、7次和9次谐波幅值下降明显，尤其是3次、5次和7次低次谐波尤为明显。这些结果进一步证明了所用改进型准PR控制器对逆变器输出电流的谐波抑制效果更好。

图19展示了不同控制算法下的稳态波形。在两种控制算法下，直流侧电压U_{dc}均存在频率100 Hz、峰值0.5 V的电压波动，此为两倍基波频率的纹波分量。由于负载为纯阻性，交流侧电压U_{ab}和交流侧电流I_{ab}基本同相位，实现了单位功率因数控制。在稳定下，交流侧电压U_{ab}的额定为220 V，交流侧电流I_s的额定为15 A。对比图17(a)和(b)可知，准PR控制下的电流更加正弦化，谐波含量更少，进一步验证了所设计的控制算法能对交流侧电流谐波进行有效抑制。



（a）瞬态电流控制下逆变器输出波形



（b）准PR控制下逆变器输出波形

图19 两种控制方法下逆变器稳态运行波形图

4 结语

本文针对基于三电平功率半导体拓扑的变换器在电力电子系统中面临的电流谐波问题，提出了一种改进型准PR电流控制策略。通过理论分析、仿真验证以及半实物实验，充分证明了所提策略在抑制电流谐波方面的有效性。改进型准PR控制器通过引入低通滤波器替代理想积分环节，不仅增强了系统的鲁棒性和抗干扰能力，而且在特定谐振频率附近实现了增益的提升，有效降低了电流的*THD*。特别是在低次谐波的抑制方面，该控制策略展现了突出的效果，进一步验证了其在实际应用中的可行性。

参考文献：

[1] 许 恺，李彦辉，陈骥群，等. 电力电子牵引变压器中的单相PWM整流器控制策略的研究[J]. 电气应用，2020，39(12)：55-62.
Xu Kai, Li Yanhui, Chen Jiqun, et al. Research on control strategy of single-phase PWM rectifer in power electronic traction transformer[J]. Electrotechnical Application, 2020, 39(12): 55-62.

[2] Rajesh J, Pulavarthi S V K, Jayaram N, et al. An advanced HBNP multi-level inverter for the performance enhancement with reduced components[J]. International Journal of Electronics, 2023, 110(5): 829-848.

[3] Ruthardt J, Woelfle J, Zehelein M, et al. A new modulation technique to control the switching losses for single phase three-level active-neutral-point-clamped-inverters [C]//PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. VDE, 2017: 1-8.

[4] 谷 鑫，姜 勃，耿 强，等. 基于3次谐波控制及脉冲波动分析的三电平SHE-PWM调制优化策略[J]. 电工技术学报，2015，30(7)：88-96.
Gu Xin, Jiang Bo, Geng Qiang, et al. An optimal SHE-PWM

modulation strategy for three-level NPC converter based on third harmonic control and pulse fluctuation analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 88-96.

[5] 苑国锋，陈　栋，郑春雨. 电力机车牵引传动系统的多模式调制策略及切换方法研究[J]. 电机与控制学报，2021，25(1)：126-135.
Yuan Guofeng, Chen Dong, Zheng Chunyu. Multi-mode modulation strategy and switching method of electric locomotive traction drive system [J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(1): 126-135.

[6] 苑国锋，沈　阳. 基于开关时刻修正的多模式调制切换策略[J]. 电工技术学报，2022，37(5)：1171-1180.
Yuan Guofeng, Shen Yang. Multi-mode modulation switching strategy based on switch time correction [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(5): 1171-1180.

[7] Kulkarni J, Yadav S K, Singh B, et al. Power quality investigation of CHB nine-level converter based large-scale solar PV system with different modulation schemes[J]. Energy Conversion and Economics, 2021, 2(3): 145-156.

[8] 殷嘉棋. 弱电网ANPC并网逆变器调控策略研究[D]. 石家庄：河北科技大学，2023.
Yin Jiaqi. Research on regulation strategy of ANPC grid-connected inverter in weak grid [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2023.

[9] 袁义生，毛凯翔. 单相PWM整流器控制器设计与动态特性的改善[J]. 电机与控制学报，2020，24(5)：34-42.
Yuan Yisheng, Mao Kaixiang. Design of the controller and improvement of the dynamic performance for single-phase PWM rectifiers [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(5): 34-42.

[10] 兰梓冉，郝瑞祥，角宏林，等. 基于重复控制和状态反馈的三相逆变器最优预见控制[J]. 电工技术学报，2022，37(6)：1473-1481.
Lan Ziran, Hao Ruixiang, Jiao Honglin, et al. Optimal preview control of three-phase inverter based on repetitive control and state-feedback [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1473-1481.

[11] 武　浩. 单相三电平NPC整流器SVPWM调制策略研究[D]. 青岛：青岛大学，2019.
Wu Hao. Research on SVPWM modulation strategy of single-phase three-level NPC rectifier [D]. Qingdao: Qingdao University, 2019.

[12] 陈　倩，杨　艳，武　浩. 单相三电平NPC整流器新型控制策略的研究[J]. 电子设计工程，2019，27(24)：84-89.
Chen Qian, Yang Yan, Wu Hao. Research on new control strategy of single-phase three-level NPC rectifier [J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(24): 84-89.

[13] 陈丹江，叶银忠. 三电平逆变器容错拓扑的多载波控制策略[J]. 上海交通大学学报，2015，49(6)：907-912.
Chen Danjiang, Ye Yinzhong. Multi-carrier control strategy for a three-level inverter tolerant topology [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2015, 49(6): 907-912.

[14] 王金平，吉耀聪，张庆岩，等. 基于调制波分解的中点钳位型三电平逆变器的混合调制策略[J]. 电机与控制学报，2023，27(11)：66-78.
Wang Jinping, Ji Yaocong, Zhang Qingyan, et al. Hybrid modulation strategy for neutral point clamped three-level inverter based on modulation wave decomposition[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(11): 66-78.

[15] Xue J, Guo X, Li S, et al. The SVPWM and PR control for single-phase three-level rectifier[C]//2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2017: 1-6.

[16] 李　智，李长喜，陈创庭，等. 电流控制型储能变流器控制稳定性分析与谐波谐振抑制技术研究[J]. 电机与控制应用，2023，50(7)：21-28，34.
Li Zhi, Li Changxi, Chen Chuangting, et al. Control stability analysis and research on harmonic resonance suppression technolgy of current-control type energy storage converter [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(7): 21-28, 34.

作者简介：

糜　松(1973—)，男，江苏省无锡市人，高级工程师，研究方向为电力电子技术、电力通信信息及新能源。