

引用格式:代子阔,刘尚坤,李冰心,等.基于混合馈入型自适应补偿的电网谐波功率放大器超宽频控制[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):245-254.

Citation: DAI Zikuo, LIU Shangkun, LI Bingxin, et al. Ultra-wideband control of harmonic power amplifier based on hybrid feed-in adaptive compensation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 245-254.

基于混合馈入型自适应补偿的电网谐波功率 放大器超宽频控制

代子阔¹, 刘尚坤², 李冰心³, 许向伟⁴, 汪 诚⁵

(1. 国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司, 辽宁 沈阳 110003; 2. 国网辽宁省电力有限公司阜新供电公司, 辽宁 阜新 123100;
3. 国网辽宁省电力有限公司盘锦供电公司, 辽宁 盘锦 124010; 4. 国网辽宁省电力有限公司朝阳供电公司,
辽宁 朝阳 122000; 5. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 基于电力电子变换器的功率放大器因其灵活易控成为电网电压模拟的理想物理接口之一。针对现有功率放大器控制方法会放大频率偏差、使滤波电路参数漂移以及难以模拟高频谐波的弊病, 首先, 提出一种混合馈入型自适应补偿的谐波功率放大器超宽频控制策略, 以高精度复现宽频电压信号并兼顾动态与稳态性能; 然后, 设计多变量混合馈入型环路以补偿系统暂态特性; 在时域下利用 Lyapunov 函数推导计及参数漂移的自适应方法以补偿滤波参数不确定性; 深入分析并克服混合自适应补偿的数字实现局限性; 讨论所提方法作为重复内嵌控制的性能提升; 最后, 制作样机, 进行所提策略动态性能与稳态精度的仿真及实验验证。结果表明: 所提方法相较于既有控制具备更快的动态响应、更高的稳态精度以及更宽的跟踪谐波频率范围, 可以实现对超宽频参考电压的快速无差跟踪。

关键词: 电网模拟; 功率放大器; 宽频; 自适应控制; 重复控制

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.04.027 中图分类号: TM46 文章编号: 1673-9140(2024)04-0245-10

Ultra-wideband control of harmonic power amplifier based on hybrid feed-in adaptive compensation

DAI Zikuo¹, LIU Shangkun², LI Bingxin³, XU Xiangwei⁴, WANG Cheng⁵

(1. Shenyang Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110003, China; 2. Fuxin Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Fuxin 123100, China; 3. Panjing Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Panjing 124010, China; 4. Chaoyang Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Chaoyang 122000, China; 5. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Power amplifiers based on power electronic converters have become one of the ideal physical interfaces for grid voltage simulation due to their flexibility and ease of control. Addressing the drawbacks of existing power amplifier control methods, which can amplify frequency deviations, cause filter circuit parameter drifts, and make it difficult to simulate high-frequency harmonics, an ultra-wideband control strategy for harmonic power amplifiers with mixed feed-in adaptive compensation is proposed. This strategy aims to accurately reproduce wideband voltage signals while balancing dynamic and steady-state performance. Next, a multivariable mixed feed-in loop is designed to compensate for the transient characteristics of the system. In the time domain, an adaptive method considering parameter drifts is derived using the Lyapunov function to compensate for uncertainties in filter parameters. The limitations of digital implementation in mixed adaptive compensation are thoroughly analyzed and overcome. The performance enhancement of the proposed method as a repeated embedded control is discussed. Finally, a prototype is built, and simulations and experiments are conducted to verify the dynamic performance and steady-state accuracy of the proposed strategy. The results indicate that compared to existing controls, the proposed method offers faster dynamic response, higher steady-

收稿日期: 2023-11-25; 修回日期: 2023-12-26

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20190461); 国网辽宁省电力有限公司科技项目(21YF-63)

通信作者: 汪 诚(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事模块化电力电子变换器主电路拓扑与性能控制等研究; E-mail: chw714@njjust.edu.cn

state accuracy, and a wider range of harmonic frequency tracking. It can achieve rapid and error-free tracking of ultra-wideband reference voltages.

Key words: emulation of power grid; power amplifier; wide bandwidth; adaptive control; repetitive control

随着风电和光伏等分布式发电的快速发展^[1-3], 电力电子设备规模化并网带来的谐波、电压不平衡等问题对电网的影响不容忽视^[4-6]。为了保证电网的稳定运行,需要研究并网设备在各类工况下的运行特性,最大限度降低对电网的不良影响^[7]。功率放大器作为电源硬件测试的关键组成部分,是虚拟系统模型与被测设备之间的重要接口,功率放大器带宽受限会导致电网各种工况的模拟精度受到影响^[8-9],因此,有必要探索超宽频高性能的功率放大器的控制方法。

传统功率放大器控制中比例积分(proportional integral, PI)控制结构简单,可以无差跟踪直流信号和基波分量,但谐波抑制能力有限,因此多应用于基波放大场合^[10-11]中。比例谐振(proportional resonance, PR)控制能实现谐波的无静差跟踪^[12],但跟踪多个频率的谐波信号时需要设计多个控制器,增加了设计工作量和系统复杂程度。文献[13]为了克服系统参数影响,提出了一种自适应控制器,能够补偿动态系统中的主电路参数,基于反推思想的设计也能保证系统的动态响应性能。然而,控制参数较多且没有给出详细参数整定方法,影响工程实用性。重复控制具有良好谐波跟踪能力,但是其动态性能饱受诟病^[14-16]。有研究者提出了基于重复控制的复合控制方法,如文献[17-18]提出状态反馈+重复控制的控制策略,借助状态反馈优化逆变器的动态性能,但依赖被控对象参数的准确性;文献[19-21]提出了PI+重复控制的控制策略,取得了良好的动态响应性能,然而受限于PI控制,依然无法实现宽频高次谐波跟踪。

为解决上述问题,本文针对级联型功率放大器结构,通过引入混合多馈入支路补偿改造系统,并利用Lyapunov函数推导得到考虑参数漂移后的自适应控制方法;进一步克服数字控制带来的实现局限,形成混合馈入型自适应补偿的超宽频控制(hybrid-fed adaptive compensation for ultra-wideband control, HFAC)策略,同时,考虑将所提策略作为重复内嵌控制,可以对系统性能实现进一步的提升,精确复现功率放大器超宽频信号。

1 功率放大器及其传统控制方法

功率放大器的拓扑结构^[22]如图1所示,由三相

脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)整流环节和逆变环节构成,其中逆变环节采用模块化结构,包括直流 CLLC 谐振隔离变换器和 H 桥逆变器。为模拟宽频输出电压,本文针对级联 H 桥逆变器的宽频性能提升控制方法展开研究。

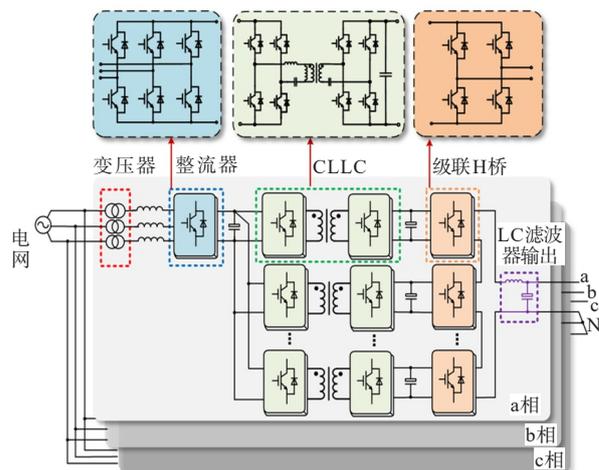


图1 功率放大器拓扑结构

Figure 1 Topology of power amplifier

级联逆变器采用三相四线制连接方式,以实现 a、b、c 三相独立控制与运行。以 a 相为例,其主电路结构如图 2 所示,包括直流等效电压源 U_{dc} 、功率开关管 $S_1 \sim S_{12}$ 、滤波电感 L 、滤波电容 C 、线路等效电阻 r 以及被测设备,其中, v_i 为变换器交流端电压, v_o 为经滤波后输出电压, i_L 为滤波电感电流, i_o 为逆变器负载电流。

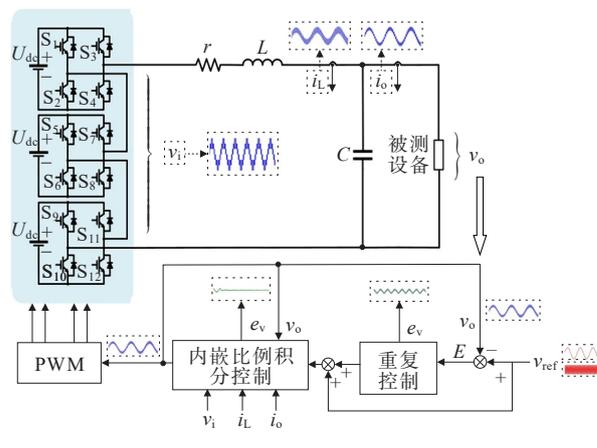


图2 单相级联七电平逆变器等效电路及其控制框图

Figure 2 Equivalent circuit of single-phase cascaded seven-level inverter and its control block diagram

由图 2 可以得到 v_o 、 i_L 的动态方程,进而可以得到被控对象传递函数,分别为

$$\begin{cases} \dot{v}_o = \frac{i_L - i_o}{C} \\ \dot{i}_L = \frac{v_i - v_o - ri_L}{L} \end{cases} \quad (1)$$

$$P(s) = \frac{1}{LCs^2 + rCs + 1} \quad (2)$$

在传统控制方式中,离散域下采用重复控制(repetitive control, RPC)的系统结构框图如图 3 所示,其中, D 代表扰动, E 代表跟踪偏差。RPC 由内模和补偿器组成,其表达式为

$$G_{rc}(z) = \frac{z^{-N}S(z)}{1 - Q(z)z^{-N}} \quad (3)$$

式中,载波比 $N=f_s/f$, f_s 为采样频率, f 为基波频率; $Q(z)$ 为内模系数; $S(z)$ 为补偿器,可用来校正被控对象。

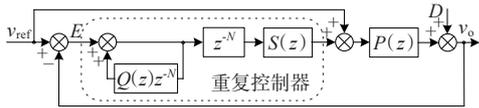


图 3 RPC 的结构框图

Figure 3 Structure of repetitive control

针对 RPC 动态性能较差的问题,通常将其与 PI 控制结合(内嵌或级联)以提高控制器的动态调节性能^[23-24],但是重复+PI 控制受 PI 参数限制,在极限取值下,被控对象即使能得到较宽的带宽,经过补偿后仍存在谐振峰,对系统的稳定控制构成威胁。因此,PI 控制的引入对于宽频输出性能的改善仍然有限,这也是提出本文研究的重要动机。

2 基于混合馈入型自适应补偿的谐波功率放大策略

2.1 混合馈入型自适应补偿控制原理

为了提高高频响应性能,可以优先引入负载前馈环节以消除干扰,同时,可以采用输出反馈以及输入顺馈的校正补偿,补偿之后系统的控制框图如图 4 所示,其中, $G_o(s)$ 为前馈补偿器传递函数, $a_1(s)$ 、 $a_2(s)$ 、 $a_3(s)$ 分别为输出电压反馈补偿、输出电压指令顺馈补偿、电感电流反馈补偿传递函数。

当加入负载电流前馈补偿后, i_o 变化时 v_i 迅速随之变化,然后 i_L 改变以补偿 i_o 的变化,减小对 v_o 的影响。引入负载电流前馈补偿器不影响原闭环系统

的稳定性,且能提高闭环系统的抗负载扰动性能,根据图 4 推导得到:

$$v_o = \frac{a_2(s)}{LCs^2 + rCs + 1 - a_1(s) - a_3(s)Cs} v_{ref} - \frac{Ls + r - a_3(s) - G_o(s)}{LCs^2 + rCs + 1 - a_1(s) - a_3(s)Cs} i_o \quad (4)$$

其中, $G_o(s) = Ls + r - a_3(s)$ 。改写式(4),可以得到:

$$\frac{v_o}{v_{ref}} = \frac{a_2(s)}{LCs^2 + rCs + 1 - a_1(s) - a_3(s)Cs} \quad (5)$$

为确定补偿器 $a_1(s)$ 、 $a_2(s)$ 、 $a_3(s)$ 最终形式,不妨假设:

$$\begin{cases} a_1(s) = k_{a1}s^2 + k_{b1}s + k_{c1} \\ a_2(s) = k_{a2}s^2 + k_{b2}s + k_{c2} \\ a_3(s) = k_{a3}s^2 + k_{b3}s + k_{c3} \end{cases} \quad (6)$$

为了实现电压无差跟踪给定电压,可确定 $k_{a2} = LC$ 、 $k_{a1} = k_{a3} = k_{b3} = 0$,将这些参数值代入式(5)、(6),可得系统闭环传递函数为

$$\frac{v_o}{v_{ref}} = \frac{LCs^2 + k_{b2}s + k_{c2}}{LCs^2 + (rC - k_{c3}C - k_{b1})s + (1 - k_{c1})} \quad (7)$$

因此该系统可简化为二阶系统,闭环系统的动态响应性能、稳定性主要由闭环极点在 s 平面上的分布位置决定。根据系统的动态性能指标,希望闭环极点位于 $s_{1,2} = -\zeta\omega_r + j\omega_r\sqrt{1-\zeta^2}$ 处,其中 ζ 、 ω_r 分别为希望的阻尼比和自然频率,取 $\zeta_r = 0.5$, $\omega_r = 7000 \text{ rad/s}$,则希望的闭环系统特征方程为

$$D_r(s) = s^2 + 2\zeta_r\omega_r s + \omega_r^2 = 0 \quad (8)$$

对比式(7)分母与式(8),可得:

$$\begin{cases} k_{c3} = r \\ k_{b1} = -2\zeta_r\omega_r LC \\ k_{c1} = 1 - \omega_r^2 LC \end{cases} \quad (9)$$

确定以上系数后对 $a_2(s)$ 的其他系数进行理想化设计,得到 $k_{b2} = 2\zeta_r\omega_r LC$ 、 $k_{c2} = \omega_r^2 LC$ 。根据图 4 可得控制律:

$$v_i = a_1(s)v_o + a_2(s)v_{ref} + a_3(s)i_L \quad (10)$$

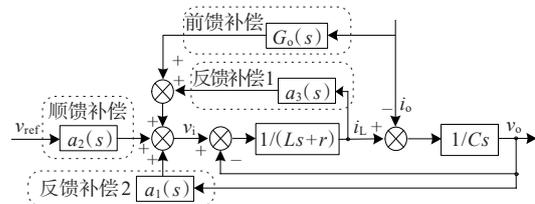


图 4 补偿后系统的控制结构框图

Figure 4 Block diagram of multi-loop compensation

在实际应用中,电感、电容等参数会随着运行环境的变化偏离离线测量值或者标称值,为了保证功率放大器逆变系统的全局稳定与实际控制效果,有必要补偿主电路未知参数。本文将基于Lyapunov稳定性定理和反推定理^[11]构造参数漂移量。根据式(4)~(10)分析结果,可将式(10)改写成时域形式,得到:

$$v_i = k_{b1}\dot{v}_o + k_{c1}v_o + LC\ddot{v}_{ref} + k_{b2}\dot{v}_{ref} + k_{c2}v_{ref} + k_{c3}i_L \quad (11)$$

式(11)可以进一步改写为

$$v_i = -(r - k_{c3})e_i - \rho e_v + v_o + ri_L + Li_d \quad (12)$$

式中, $\rho = k_{c2} + (r - k_{c3})k_{b1}/L$, $e_v = v_o - v_{ref}$, $e_i = i_L - i_d$; i_d 为理想虚拟控制器输出, $i_d = (k_{b1}/L)e_v - C\dot{e}_v + i_c$ 。

根据式(12)控制律,可以得到全局Lyapunov函数:

$$V = \frac{Ce_v^2}{2} + \frac{Le_i^2}{2\rho} \quad (13)$$

进一步考虑电阻、电感和电容参数变化,可以选择全局的Lyapunov函数:

$$V = \frac{Ce_v^2}{2} + \frac{Le_i^2}{2\rho_1} + \frac{\tilde{C}^2}{2\gamma_C} + \frac{\tilde{L}^2}{2\gamma_L\rho_1} + \frac{\tilde{r}^2}{2\gamma_r\rho_1} \quad (14)$$

定义 $\tilde{C} = C - \hat{C}$, $\tilde{L} = L - \hat{L}$, $\tilde{r} = r - \hat{r}$, $\rho_1 = k_{c2} + [(\hat{r} - k_{c3})k_{b1} + (\hat{C} - C)(\hat{r} - k_{c3})^2]/L$ 。因此,可以得到:

$$v_i = -(\hat{r} - k_{c3})e_i - \rho_1 e_v + v_o + \hat{r}i_L + \hat{L}\dot{i}_d \quad (15)$$

其中, \dot{i}_d 是理想虚拟控制器输出 i_d 的微分估计值,考虑参数变化后其表达式如下:

$$\dot{i}_d = -(k + \dot{\hat{C}})\dot{e}_v - \dot{\hat{C}}\dot{e}_v + \dot{i}_c \quad (16)$$

式中, $k = [k_{b1} + (\hat{C} - C)(\hat{r} - k_{c3})]/(-\hat{L})$; \hat{C} 、 \hat{L} 、 \hat{r} 分别为 C 、 L 、 r 的估计值, \hat{C} 、 \hat{L} 、 \hat{r} 均由投影算法计算得到,用于补偿逆变系统主电路未知参数,其更新律满足:

$$\begin{cases} \dot{\hat{C}} = \gamma_C \text{Proj}(e_v \dot{e}_v, \underline{C}, \bar{C}) \\ \dot{\hat{L}} = \gamma_L \text{Proj}(-e_i \dot{i}_d, \underline{L}, \bar{L}) \\ \dot{\hat{r}} = \gamma_r \text{Proj}(-e_i i_L, \underline{r}, \bar{r}) \end{cases} \quad (17)$$

式中, γ_C 、 γ_L 、 γ_r 为自适应增益,本文中选取 $\gamma_C = \gamma_L = \gamma_r = 2 \times 10^{-10}$; \underline{C} 和 \bar{C} 、 \underline{L} 和 \bar{L} 、 \underline{r} 和 \bar{r} 分别为自定义的 \hat{C} 、 \hat{L} 、 \hat{r} 的上限和下限,本文中选取 $\underline{C} = 0.8C$ 、 $\bar{C} = 1.2C$ 、 $\underline{L} = 0.8L$ 、 $\bar{L} = 1.2L$ 、 $\underline{r} = 0.8r$ 、 $\bar{r} = 1.2r$ 。

根据式(11)~(17)分析,最终可得考虑参数变化后的自适应控制下 s 域系统控制律:

$$v_i = [\hat{L}(C - \hat{C})s^2 + k_{b1}s - k_{c2} + 1]v_o + [\hat{L}\hat{C}s^2 + (\hat{r}C - k_{c3}C - k_{b1})s + k_{c2}]v_{ref} + k_{c3}i_L \quad (18)$$

因此,可以得到最终的前馈环路传递函数如下:

$$\begin{cases} a_1(s) = \hat{L}(C - \hat{C})s^2 + k_{b1}s - k_{c2} + 1 \\ a_2(s) = \hat{L}\hat{C}s^2 + (\hat{r}C - k_{c3}C - k_{b1})s + k_{c2} \\ a_3(s) = k_{c3} \end{cases} \quad (19)$$

2.2 所提控制策略的数字实现局限性分析

在实际数字控制中,采样和计算存在延时,因此,电力电子电路所复现的脉冲电压信号总是滞后于电压指令值一个采样周期^[25]。为了考虑此延迟以及脉冲宽度调制环节的零阶保持器(zero-order holder, ZOH)特性,在HFAC控制系统中加入一拍延时和零阶保持器,并将连续控制系统离散化,得到HFAC数字控制系统等效框图,如图5所示,其中, $P_1(z)$ 为 $P_1(s)$ 的离散形式, $P_1(s)$ 传递函数为

$$P_1(s) = Cs/(LCs^2 + rCs + 1) \quad (20)$$

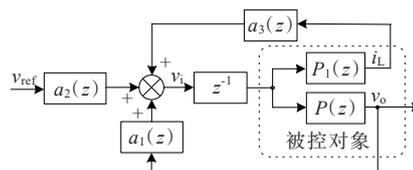


图5 HFAC控制系统离散等效框图

Figure 5 Block diagram of discrete HFAC

进一步,由图5可得系统 v_{ref} 到 v_o 的闭环脉冲传递函数:

$$H(z) = \frac{z^{-1}a_2(z)P(z)}{1 - z^{-1}a_1(z)P(z) - z^{-1}a_3(z)P_1(z)} \quad (21)$$

由式(21)可推导得到HFAC离散控制系统在估计值 \hat{C} 、 \hat{L} 、 \hat{r} 变化下的零极点分布,如图6所示,可以观察到所有极点均在单位圆内,证明HFAC离散控制系统是稳定的。同时,根据式(21)可得HFAC离散控制系统的闭环频率特性,如图7所示,可知相较于极限取值下的内嵌PI型重复控制,HFAC控制可以提高系统带宽至5.74 kHz,显著改善了系统动态性能。在中低频段,系统基本能实现单位增益零相移的跟踪效果,亦具备优越的稳态跟踪性能。然而,由于控制延迟的影响,在中频段HFAC控制逐渐体现出相位滞后,而且1.8 kHz处存在的14.2 dB谐振峰尤其加大了高频稳定、高精度控制的难度。

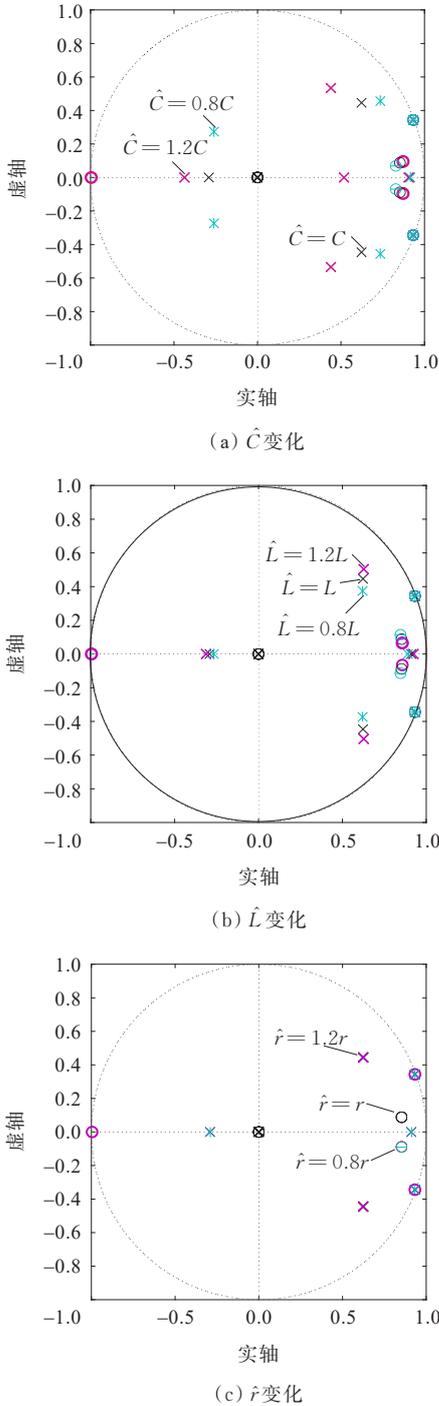


图 6 HFAC 离散控制系统在 \hat{C} 、 \hat{L} 、 \hat{r} 变化时的零极点分布

Figure 6 Zero and pole distributions of discrete HFAC for variations of \hat{C} , \hat{L} , and \hat{r}

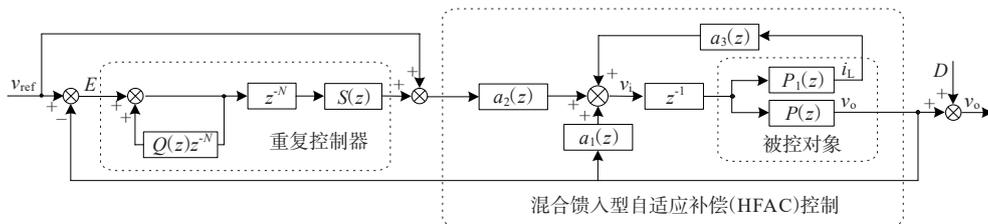


图 8 HFAC-RPC 的控制框图

Figure 8 Block diagram of HFAC-RPC

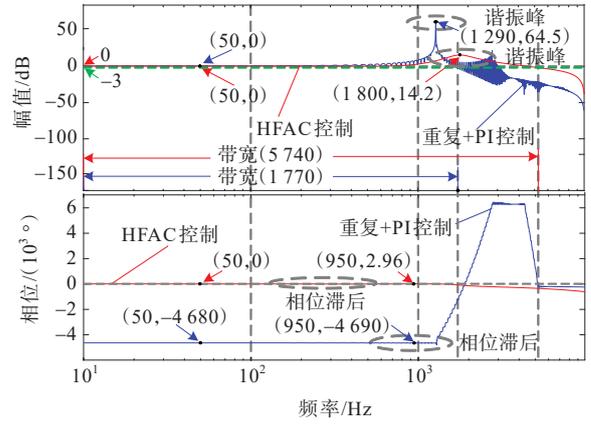


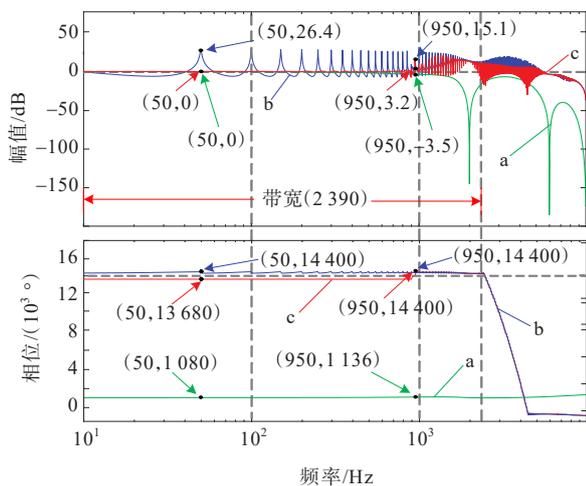
图 7 离散系统闭环频率特性

Figure 7 Closed-loop frequency characteristics of discrete system

2.3 内嵌 HFAC 型重复控制

针对上述系统跟踪性能存在的不足,可以结合既有控制进行改善,即将本文所提 HFAC 控制内嵌于 RPC 内环之中,得到内嵌混合馈入型自适应补偿的超宽频重复控制 (ultra-wideband repetitive control with embedded hybrid-fed adaptive compensation, HFAC-RPC),控制框图如图 8 所示,更进一步提升功率放大器系统的高频控制性能。

HFAC-RPC 的频率特性如图 9 所示,可知补偿后的新被控对象(经 HFAC 控制)的频率特性,即高频段已经不存在谐振峰;并且系统开环频率特性在基波至 19 次谐波处的开环增益大于 15 dB;HFAC-RPC 的闭环频率特性不仅满足中低频段单位增益零相移,还实现了高频段衰减的要求,同时可以观察到系统带宽为 2.39 kHz,动态性能也得到了显著改善。考虑到工程实际中的应用多为中低频场景,本文所提 HFAC 策略能够实现功率放大器在中低频段对于模拟电压的超宽频高性能跟踪,且能兼顾控制实现的经济性。若需提高更高频场景的跟踪性能,可以在牺牲经济性的前提下引入重复控制,实现对被控系统更高性能的控制目标。



a. 补偿后的新被控对象(经 HFAC 控制)频率特性;
b. 系统开环频率特性;c. 系统闭环频率特性

图 9 HFAC-RPC 策略的频率特性

Figure 9 Frequency characteristics of system with HFAC-RPC strategy

3 仿真验证与分析

进一步对所提控制的优势进行仿真分析,在 MATLAB/SIMULINK 中搭建三单元 H 桥级联型功率放大器模型,采用载波移相正弦脉宽调制,设计参数如表 1 所示。首先在空载条件下测试输出电压的谐波含量是否与给定信号一致,给定信号含基

波和 3、5、7、9、11、13、15、17 及 19 次谐波,谐波幅值为基波幅值的 5%,其表达式为

$$v_{ref} = 220\sqrt{2} \left[\sin(\omega t) + 5\% \times (\sin(3\omega t) + \sin(5\omega t) + \sin(7\omega t) + \sin(9\omega t) + \sin(11\omega t) + \sin(13\omega t) + \sin(15\omega t) + \sin(17\omega t) + \sin(19\omega t)) \right] \quad (22)$$

空载情况下仿真波形的快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)分析如图 10 所示,可知 HFAC 和 HFAC-RPC 对谐波的跟踪精度远高于双闭环 PI 控制,具有较好的跟踪性能,在高频谐波部分, HFAC-RPC 能够体现出更优越的跟踪性能。然后在阻感负载条件下,对系统动态响应性能进行测试,当参考波为基波,系统由空载状态到阻感负载状态的仿真波形如图 11 所示。

表 1 逆变器设计参数

Table 1 Design parameters of inverter

等效滤波电阻 r/Ω	滤波电感 L/mH	滤波电容 $C/\mu F$	模块数量	输出电压有效值 v_{rms}/V
0.5	2	15	3	220
目标频率 f/Hz	直流侧电压 U_{dc}/V	系统采样频率 f_s/kHz	开关频率 f_{sw}/kHz	
50	150	20	10	

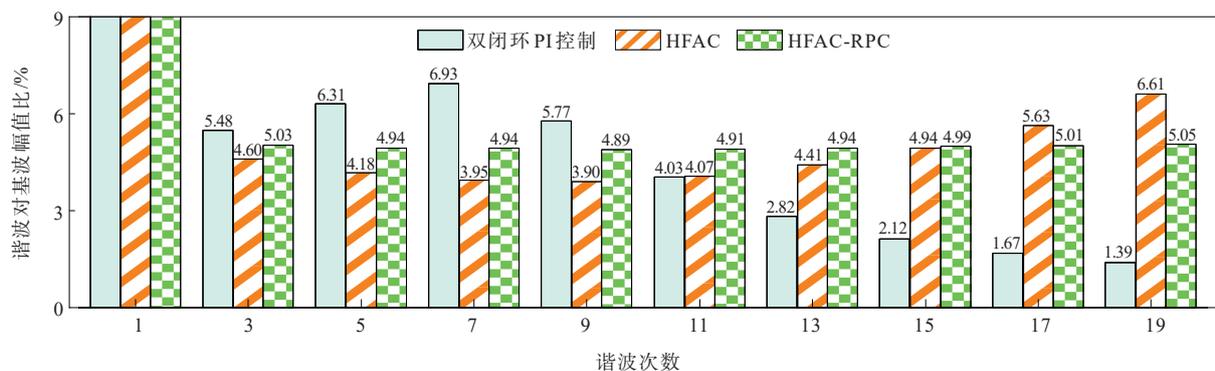


图 10 空载情况下输出电压仿真波形的 FFT 分析

Figure 10 FFT analysis of output voltage under no-load condition

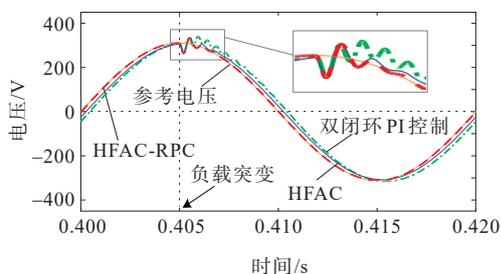


图 11 负载突变工况下的输出电压仿真波形

Figure 11 Waveform of output voltage under sudden load change

双闭环 PI 控制稳态时的输出电压有效值为 222.5 V, 稳态精度为 1.14%, 电压谐波总畸变率 (total harmonic distortion, THD) 为 0.17%, 突加阻感负载时电压跌落为 46.8 V, 约 0.005 s 后输出电压恢复稳态; HFAC 稳态时输出电压有效值为 217.3 V, 稳态精度为 1.23%, THD 为 0.16%, 突加阻感负载时电压跌落为 44.1 V, 约 0.002 s 后输出电压恢复稳态; HFAC-RPC 的输出电压有效值为 219.9 V, 稳态精度为 0.05%, THD 为 0.23%, 突加

阻感负载时电压跌落为 46.6 V,约 0.002 s 后输出电压恢复稳态。可见,HFAC 的稳态性能和双闭环 PI 控制接近,但动态响应性能更优,同时,结合 RPC 后能够进一步提高稳态性能,更好地保证输出电压波形质量。

4 实验验证与分析

本文对所提策略进行实验验证。硬件平台如图 12 所示,包括可配置功率模块、LC 滤波器、阻感负载、可编程直流电源、DSP 控制板和测量仪器等。系统的实验参数如表 2 所示。

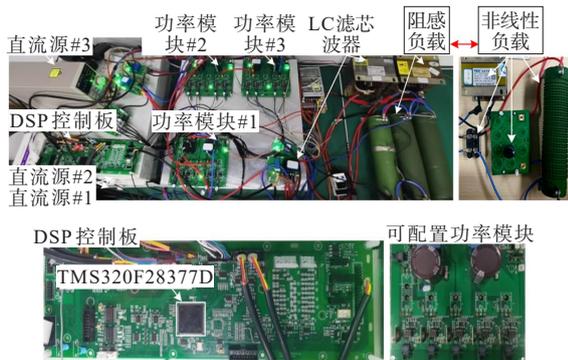


图 12 功率放大器实验平台

Figure 12 Experimental platform of power amplifier

表 2 实验参数

Table 2 Experimental parameters

等效滤波电阻 r/Ω	滤波电感 L/mH	滤波电容 $C/\mu F$	模块数量 N	额定功率 P/W
0.5	2	15	3	220
输出电压有效值/频率 $v_{rms}/f/(V \cdot Hz^{-1})$		(模块)直流侧电压 U_{dc}/V	系统采样频率 f_s/kHz	开关频率 f_{sw}/kHz
100/50		60	20	10
阻感负载		非线性负载(不控整流)		
电阻 R_L/Ω	电感 L_L/mH	电阻 R_L/Ω	电感 L_L/mH	电容 $C_L/\mu F$
25	2	25	4.45	100

4.1 稳态性能

在给定电压/频率为 100 V/50 Hz、阻感负载以及给定电压/频率为 50 V/50 Hz、非线性负载(对应电路结构如图 13 所示)的条件下,测试系统在不同控制策略情况下的稳态性能,实验结果分别如图 14、15 所示。由图 14 可以看出,通过对比输出电压波形的 THD,本文所提的 HFAC 和 HFAC-RPC 的波形正弦度更好,相较之下,双闭环 PI 控制的波形质量较差;通过对比输出电压幅值可知,

HFAC-RPC 的稳态精度最高,HFAC 的稳态跟踪性能与双闭环 PI 控制接近。非线性负载情况下(图 15)能得出类似的结论。综上,本文所提 HFAC 结合重复控制后得到的 HFAC-RPC 波形正弦度最好(THD 最低),稳态精度也最高,体现了本文所提控制方法对基频信号较高的跟踪精度。

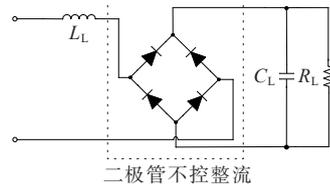


图 13 非线性负载的电路结构

Figure 13 Circuit structure of nonlinear load

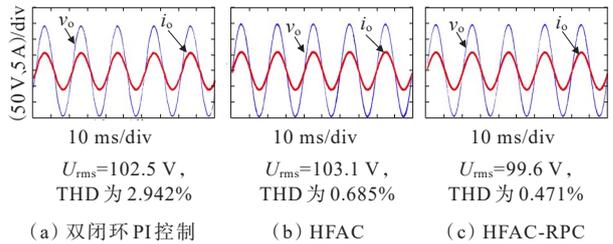


图 14 阻感负载时不同控制方法的稳态性能对比

Figure 14 Comparison of steady-state performance of different control methods under resistive load

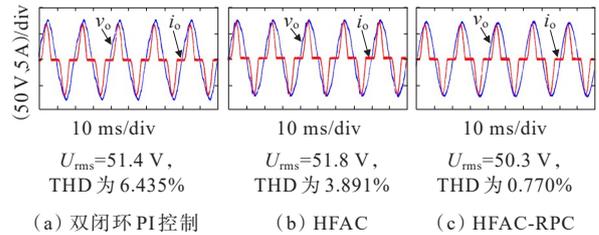


图 15 非线性负载时不同控制方法的稳态性能对比

Figure 15 Comparison of steady-state performance of different control methods under nonlinear load

4.2 动态性能

在给定电压幅值跌落 20% 以及突加负载的 2 种条件下,测试系统在不同控制策略下的动态响应性能,实验结果分别如图 16、17 所示。

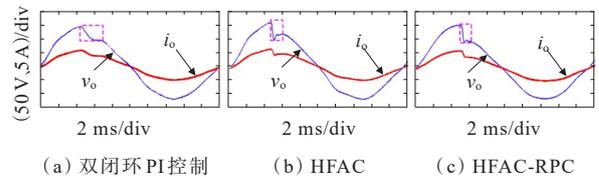


图 16 给定电压幅值跌落 20% 时不同控制方法的动态性能对比

Figure 16 Comparison of dynamic performance of different control methods when a given voltage amplitude falls by 20% resistive load

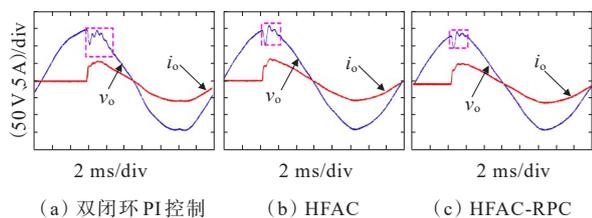
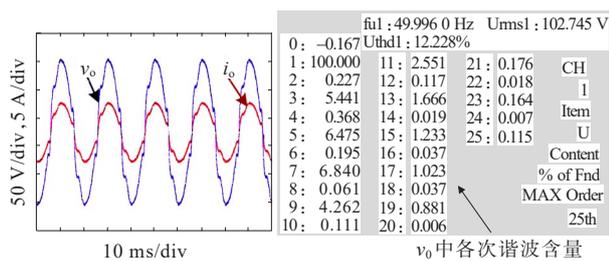


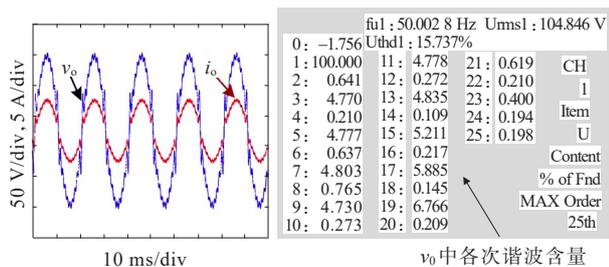
图 17 突加负载时不同控制方法的动态性能对比

Figure 17 Comparison of dynamic performance of different control methods under sudden load

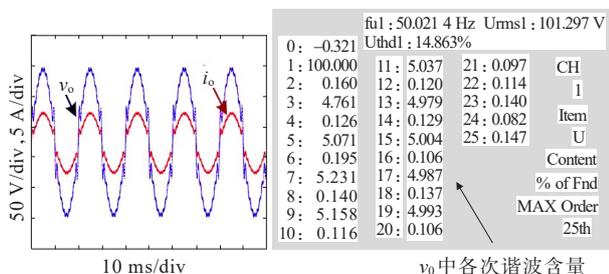
由图 16 可以看出,当电压指令值突变(跌落 20%),双闭环 PI 控制不能及时跟踪电压指令值变化,相比之下,HFAC 的调节时间较短,动态性能更好,而 HFAC-RPC 因为内环采用了 HFAC,所以同样具备较好的动态性能。进一步地,当负载突变(从空载切换到满载)(图 17),双闭环 PI 控制的暂态过程较长,相对而言,HFAC 和 HFAC-RPC 均能在 2 ms 内恢复稳定,动态特性较好。



(a) 双闭环 PI 控制



(b) HFAC



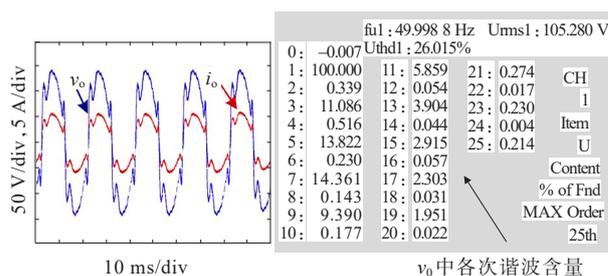
(c) HFAC-RPC

图 18 谐波含量为 5% 工况下的输出电压及其 FFT 分析
Figure 18 Output voltage and its FFT analysis under harmonic content condition of 5%

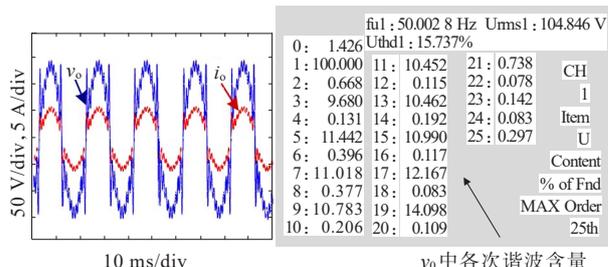
4.3 谐波跟踪性能

为了进一步验证所提方法的超宽频控制特点,在给定电压为 100 V、50 Hz 基波、含 3~19 次的奇次谐波,谐波幅值为基波幅值的 5%、10% 的条件下,测试系统的谐波跟踪性能,实验结果分别如图 18~20 所示。

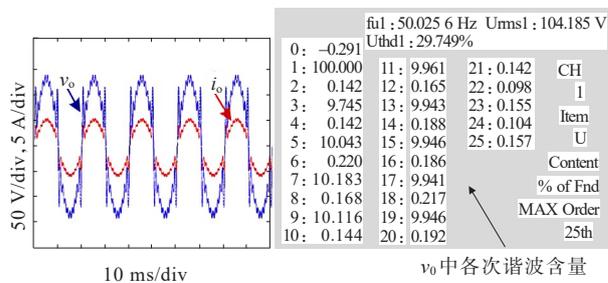
由图 18 可以看出,当注入 5% 谐波时,双闭环 PI 控制对于不同频率谐波成分的跟踪性能差异明显,对 3 次谐波的跟踪误差为 10%,对 5、7 和 9 次谐波的跟踪误差增大为 30%,对于高频谐波的跟踪性能则更差。相对而言,HFAC 的跟踪误差在全频段范围的一致性较好,基本保持在 10% 以内。然而,这一控制在低频段谐波有所衰减,对高频段谐波有所放大(19 次谐波为 6.766%),这与图 7 所展示的 HFAC 频率特性分析结果保持一致。HFAC-RPC 策略结合了 RPC,谐波跟踪性能获得更进一步的提升,全频段跟踪误差保持在 1%~5%。当注入 10% 谐波时能得出类似结论(图 19)。



(a) 双闭环 PI 控制



(b) HFAC



(c) HFAC-RPC

图 19 谐波含量为 10% 工况下的输出电压及其 FFT 分析
Figure 19 Output voltage and its FFT analysis under harmonic content condition of 10%

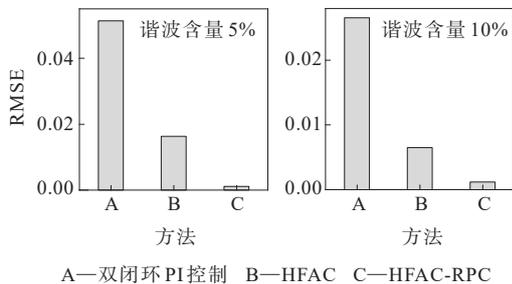


图20 基波、3~19次的奇次谐波RMSE对比
Figure 20 Comparison of fundamental and odd harmonics of 3rd to 19th RMSE

为了定量对比2种工况下的谐波跟踪效果,采用均方根误差(root mean square error, RMSE)衡量预测值与真实值之间的偏差。由图20可以看出,相较于双闭环PI控制, HFAC和HFAC-RPC这2种方法在不同工况下对50 Hz基波、3~19次的奇次谐波跟踪的RMSE数值更低,其中HFAC-RPC具有最低的RMSE数值,说明在谐波跟踪中本文所提方法能够实现更高精度的跟踪。

5 结语

本文针对用于电网谐波电压模拟的级联型功率放大器,提出了一种混合馈入型自适应补偿的超宽频控制策略,实现了对电网谐波的快速无差跟踪复现。首先,分析了传统重复内嵌比例积分控制方法对宽频信号跟踪的局限,依此设计了顺馈、前馈与反馈的多环路补偿系统的不确定性,改造了控制对象模型并实现了精确建模情况下的超宽频信号零静差跟踪;其次,考虑到实际工况下的硬件参数漂移,基于Lyapunov函数推导得到了与多路补偿协调的自适应控制方案,即HFAC策略,同时,分析了HFAC的数字实现局限性,进一步进行完善设计,提高了所提方法的工程实用性;最后,针对HFAC策略在高频段存在的不足,讨论考虑引入重复控制器作为外环,将二者结合形成了HFAC-RPC策略,实现了对更宽频输出的高性能控制。仿真和实验分析证明了所提策略相较于既有控制方法,具备更快的动态响应、更高的稳态精度以及更宽的跟踪谐波频率范围。

参考文献:

[1] 杨婧颖,王武林,张明敏,等.考虑分布式光伏和储能参与的配电网电压分层控制方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(5):111-120+215.
YANG Jingying, WANG Wulin, ZHANG Mingmin, et al.

Voltage hierarchical control method of distribution network considering distributed photovoltaic and energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 111-120+215.

[2] WANG C, ZHANG K, XIONG J, et al. A coordinated compensation strategy for module mismatch of CHB-PV systems based on improved LS-PWM and reactive power injection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 2825-2836.

[3] WANG C, LI L. Efficient DC Voltage balancing of cascaded photovoltaic system based on predictive modulation strategy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(2): 1514-1524.

[4] 常继凯,舒勤,李鸿鑫,等.计及电缆分布电容的并网逆变器谐振特性与抑制[J].电力科学与技术学报,2023,38(3):114-123.
CHANG Jikai, SHU Qin, LI Hongxin, et al. Resonance characteristics and suppression of grid-connected inverter system considering cable distributed capacitance [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 114-123.

[5] 李建闽,曹远远,姚文轩,等.基于自适应移频滤波的电力系统谐波分析方法[J/OL].电工技术学报:1-10[2023-10-15]. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230786.
LI Jianmin, CAO Yuanyuan, YAO Wenxuan, et al. Power system harmonic analysis method based on adaptive frequency-shift filtering[J]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-10[2023-10-15]. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230786.

[6] 吴斌,杨旭红.基于改进遗传PI和重复控制的三相逆变器并网研究[J].电力科学与技术学报,2021,36(6):151-156.
WU Bin, YANG Xuhong. Research on grid-connected three-phase inverter based on improved genetic PI and repetitive control[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(6): 151-156.

[7] 高淑萍,李晓芳,宋国兵,等.基于Pearson相关系数与广义S变换的低压直流微电网的故障选线方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(15):120-129.
GAO Shuping, LI Xiaofang, SONG Guobing, et al. Fault line selection method of a low-voltage DC microgrid based on the pearson correlation coefficient generalized S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 120-129.

[8] SOBANSKI P, MISKIEWICZ M, BUJAK G, et al. Real time simulation of power electronics medium voltage DC-grid simulator[J]. Energies, 2021, 14(21): 7368-7368.

[9] 韩蓉,徐千鸣,丁红旗,等.模块化多电平中高压电网模拟器及其控制[J].电工技术学报,2018,33(S1):165-175.
HAN Rong, XU Qianming, DING Hongqi, et al. Modular

- multi-level high voltage grid simulator and its control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S1):165-175.
- [10] 王泽尚,孙立清,王志福,等.基于扰动补偿的电机模拟器电流控制策略[J].电工技术学报,2023,38(22):5987-5998.
WANG Zeshang, SUN Liqing, WANG Zhifu, et al. Current control strategy of electric motor emulator based on disturbance compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22):5987-5998.
- [11] 何胜华,范必双,夏侯智聪,等.一种新颖的模糊自耦合PI在风力机MPPT控制中的应用[J].电力系统保护与控制,2023,51(9):46-55.
HE Shenghua, FAN Bishuang, XIAHOU Zhicong, et al. A novel fuzzy self-coupled PI for wind turbine MPPT control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(9):46-55.
- [12] 陈旭,张卓然,于立,等.基于改进型准比例谐振控制的电励磁双凸极电机电流谐波抑制方法[J].电工技术学报,2023,38(14):3836-3848+3861.
CHEN Xu, ZHANG Zhuoran, YU Li, et al. Current harmonic suppression method of doubly salient electromagnetic machine based on improved quasi proportional resonant control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(14):3836-3848+3861.
- [13] WANG C, HE L. High-performance adaptive control for inverter-based residential microgrids[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 2019.
- [14] WANG C, DUAN J, FAN B, et al. Decentralized high-performance control of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3):3355-3363.
- [15] ZOU Z, ZHOU K, WANG Z, et al. Frequency-adaptive fractional-order repetitive control of shunt active power filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3):1659-1668.
- [16] LIU T, WANG D, ZHOU K. High-performance grid simulator using parallel structure fractional repetitive control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(3):2669-2679.
- [17] 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.
- [18] 张凯,彭力,熊健,等.基于状态反馈与重复控制的逆变器控制技术[J].中国电机工程学报,2006,26(10):57-62.
ZHANG Kai, PENG Li, XIONG Jian, et al. State-feedback-with-integral control plus repetitive control for PWM inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 57-62.
- [19] 张兴,汪杨俊,余畅舟,等.采用PI+重复控制的并网逆变器控制耦合机理及其抑制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(30):5287-5295.
ZHANG Xing, WANG Yangjun, YU Changzhou, et al. Mechanism of the control coupling and suppression strategy using pi and repetitive control in grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30):5287-5295.
- [20] 赵强松,陈莎莎,周晓宇,等.用于并网逆变器谐波抑制的重复-比例复合控制器分析与设计[J].电工技术学报,2019,34(24):5189-5198.
ZHAO Qiangsong, CHEN Shasha, ZHOU Xiaoyu, et al. Analysis and design of combination controller based on repetitive control and proportional control for harmonics suppression of grid-tied inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24):5189-5198.
- [21] 汪洋,陈权,胡存刚.基于PI+重复控制的三电平逆变器研究[J].电力电子技术,2021,55(7):113-116.
WANG Yang, CHEN Quan, HU Cungang. Research on three-level inverter based on PI+repetitive control[J]. Power Electronics, 2021, 55(7):113-116.
- [22] 张凯,谢源,刘浩,等.基于准比例谐振双闭环控制的电网模拟器逆变侧设计[J].电测与仪表,2022,59(12):137-143.
ZHANG Kai, XIE Yuan, LIU Hao, et al. Design of Inverter side of power grid simulator based on quasi-proportional resonant double closed-loop control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12):137-143.
- [23] ZHAO Q, YE Y, XU G, et al. Improved repetitive control scheme for grid-connected inverter with frequency adaptation[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(5):883-890.
- [24] YANG Y, YANG Y, HE L, et al. A novel cascaded repetitive controller of an LC-filtered H6 voltage-source inverter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(1):556-566.
- [25] WANG C, JAIDAA A, WANG Z, et al. An effective decoupling control with simple structure for induction motor drive system considering digital delay[J]. Electronics, 2021, 10(23):3048.