

一种基于积分分离思想的改进重复控制策略

杨树德¹, 司舒洁¹, 张新闻², 王喜刚³

(1. 扬州大学 电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 北方民族大学 电气信息工程学院, 宁夏 银川 750021; 3. 国网陕西省电力有限公司延安供电公司, 陕西 延安 716000)

摘要: 重复控制可在静止坐标系下获得较高的稳态性能, 因此在并网变流器(GTC)控制中广泛应用。然而, 其对信号周期性的积分作用会导致输出电流在暂态大偏差工况下出现周期性畸变。为抑制此问题, 首先建立重复控制下GTC的数学模型并设计控制参数; 其次, 分析暂态过程中输出电流周期性畸变的产生机理, 据此提出一种基于积分分离思想的改进重复控制策略, 该策略依据误差幅值动态决定是否更新重复控制器的内模输出, 从而显著改善暂态大偏差工况下的电流周期性畸变; 最后, 通过仿真和实验验证所提策略的有效性。

关键词: 重复控制; 并网变流器; 周期性畸变; 积分分离思想; 暂态过程

中图分类号: TM461

文献标志码: A

DOI: 10.20204/j.sp.2025.09012

An Improved Repetitive Control Strategy Based on Integral Separation Principle

YANG Shude¹, SI Shujie¹, ZHANG Xinwen², WANG Xigang³

(1. School of Electrical and Energy Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750021, China;

3. State Grid Yan'an Power Supply Company, Yan'an 716000, China)

Abstract: Repetitive control achieves high steady-state performance in a stationary coordinate system and is widely adopted in grid-tied converter (GTC) control. However, its integral action on periodic signals causes periodic distortion in output currents under large-deviation transients. To address this issue, this study first establishes a mathematical model of GTC under the repetitive control and designs control parameters. Subsequently, the generation mechanism of periodic current distortion during transients is analyzed. Based on this, an improved repetitive control strategy incorporating integral separation principle is proposed. This strategy dynamically determines whether to update the internal model output of the repetitive control controller based on error magnitude, thereby significantly mitigating current periodic distortion during large-deviation transients. Finally, simulations and experiments validate the effectiveness of the proposed strategy.

Key words: repetitive control; GTC; periodic distortion; integral separation principle; transient process

0 引言

并网变流器(Grid-tied Converter, GTC)作为新能源发电、电能质量治理以及列车牵引等领域的重要环节, 其现代电力系统中得到广泛应用^[1-3]。对于GTC而言, 其输出电流为交流量, 因此如何实现对交流量的高性能跟踪控制是一个亟待解决的重要问题。如果引入坐标变换将静止坐标系下的正弦量变换至 dq 坐标系下的直流量, 则可以利用比例积

分控制器实现对正弦量的无静差跟踪^[4], 但坐标变换需要多次求解三角函数运算, 控制算法较为复杂。另一种方案是采用比例谐振或准比例谐振控制器^[5-6], 由于二者在谐振频率处具有很高的增益, 因此可以在静止坐标系下实现对正弦量的高性能跟踪。然而, 这2种方案只适用于单一频率正弦量给定信号的情况。如果给定或者扰动中含有多个频率成分, 则需进行多次坐标变换^[7-8]或采用多个谐振调节器并联的形式^[9], 这对控制算法的执行速度及控制器的参数设计均构成严峻挑战。

与这2种方案相比, 基于内模原理的重复控制器(Repetitive Controller, RC)可以实现多个谐振调节

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52367018)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (52367018)

器的并联控制效果。该控制器在自然坐标系下不仅能实现对多个频率信号的高性能追踪,还可有效抑制诸如死区、电网电压背景谐波等重复性扰动对并网电流质量的影响,此外,其算法简单,需要设计的控制参数较少,因此在 GTC 控制中受到较高关注^[10-12]。

目前,众多学者在提升 RC 性能并取得实质性进展。针对电网频率变化导致传统 RC 谐波跟踪能力下降的问题,文献[13-14]分别采用基于拉格朗日插值的分数阶滤波器和基于 Thiran 算法的无限脉冲响应滤波器来近似分数阶延时,实现了定采样速率下 RC 的频率自适应控制。为了提高 RC 的响应速度,文献[15]提出一种针对奇次谐波进行追踪的 RC,将内模更新频率提高到传统 RC 的 2 倍。文献[16]给出了针对三相整流电路中 $6k \pm 1$ 次谐波进行跟踪的 RC,结合坐标变换可将内模更新的频率提高到传统 RC 的 6 倍。综合考虑各应用场合谐波特性的不同,文献[17]对具有不同内模更新频率的 RC 进行了统一,提出一种 $nk \pm m$ 次谐波 RC,通过选择不同的 n 和 m 值,可对需要跟踪的谐波类型进行设计。此外,文献[18]通过在双模 RC 的奇、偶次内模中引入前馈来提高 RC 的动态性能。

值得注意的是,除了文献[13-18]中所关注的电网频率适应性和响应速度的问题外,RC 具有对交流信号具有逐周期积分的特性,所以在在大偏差暂态过程中易导致输出电流出现周期性畸变,会对系统造成冲击。比如,文献[18-21]的暂态实验结果中输出电流均出现了周期性畸变。然而,当前很少有文献针对该问题进行研究。

综上所述,本文以静止无功发生器(Static Var Generator,SVG)作为具体的研究对象,剖析其在 RC 控制下的暂态过程中输出电流出现周期性畸变的产生机理,研究表明,该畸变的根本原因在于比例和重复控制环节响应速度的不同。为此,提出一种根据误差大小决定是否更新内模输出的改进 RC 策略,并且给出了误差阈值的设计方法。仿真与实验结果表明,本文所提改进后的 RC 策略可显著减小暂态大偏差工况下 GTC 输出电流的周期性畸变。

1 RC 下 GTC 的数学模型与控制参数设计

1.1 RC 下 GTC 的数学模型

典型的 GTC 主电路及控制原理如图 1 所示。为了减小实际工况下装置运行时电网电压 v_g 中开

关噪声对信号采样的影响,图 1 中将 v_g 经过二阶低通滤波器 VSF 处理后的输出量 v_F 作为控制系统的输入信号^[22-23]。GTC 的电流控制过程为:首先将输出电流指令 i_o^* 与实际输出电流 i_o 的偏差 e_i 作为电流控制器 G_{p_RC} 的输入信号,再将 G_{p_RC} 的输出与 v_F 相加(引入电网电压前馈)后得到 GTC 交流侧输出电压的参考值 v_M 。对于数字控制系统来讲, v_M 通常在下一控制周期开始被装载,其引入的一拍延时用 e^{-sT_s} 来表示(T_s 为控制周期, s 为拉普拉斯算子),当 v_M 被装载后将在 1 个控制周期内保持不变,具有零阶保持器特性,用 ZOH 表示,该环节产生的延时约为半拍^[24-25]; v_M 经过 1 拍延时和 ZOH 环节后得到 SPWM 正弦脉宽调制信号,从而将直流侧电容 C 上的电压 V_{dc} 逆变成输出电压 v_o ,即通过调节 v_o 实现对滤波电感 L_f 上输出电流 i_o 的控制。

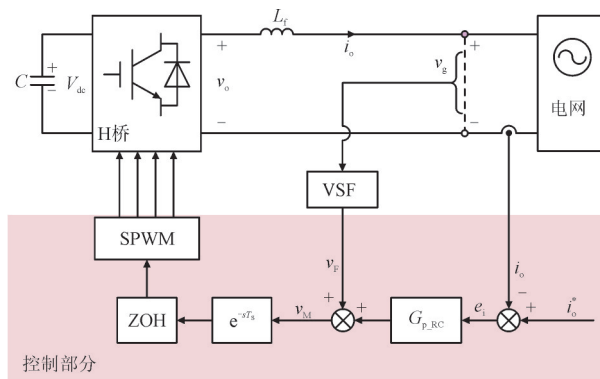


图1 GTC 的主电路及控制原理

Fig.1 Main circuit and control principle of GTC

不同类型 GTC 输出电流指令的构造方式有所区别。对于本文研究对象 SVG 而言,其有功电流的幅值由直流电压外环调节器确定,而无功电流的幅值由待补偿负载决定或人为设定。最终,根据两者的幅值大小和锁相环输出的相位信息,得到电流指令中的有功和无功分量。然而,考虑到锁相环^[26-27]和直流电压外环的速度通常远小于电流内环,因此文中忽略了两者对电流内环性能的影响^[28-29]。

基于图 1 所示结构 GTC 的电流内环控制模型如图 2 所示。

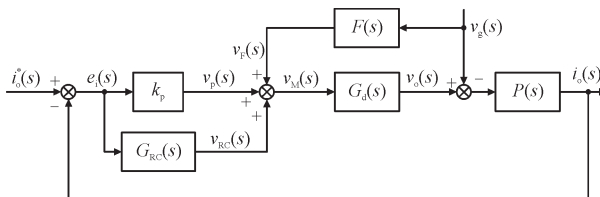


图2 电流内环控制模型

Fig.2 Inner-loop current control model

图 2 中, k_p 为比例系数,与重复控制器 $G_{RC}(s)$ 并

联构成比例重复控制器, $v_p(s)$ 和 $v_{RC}(s)$ 分别为比例控制器和重复控制器的输出量, $G_d(s)$ 为综合考虑一拍滞后装载和零阶保持器所产生的 1.5 拍延时, 可表示为^[30]:

$$G_d(s) = e^{-1.5T_s} \approx \frac{1 - 0.75T_s s}{1 + 0.75T_s s} \quad (1)$$

$F(s)$ 为二阶低通滤波器, 表达式为:

$$F(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + \frac{\omega_c}{Q_f}s + \omega_c^2} \quad (2)$$

式中: ω_c , Q_f 分别为滤波器的截止角频率和品质因数。

$P(s)$ 为被控对象, 表达式为:

$$P(s) = \frac{1}{L_f s} \quad (3)$$

根据图 2 可导出电流误差的表达式为:

$$e_i(s) = \frac{i_o^*(s) - v_g(s)P(s)[F(s)G_d(s) - 1]}{1 + P(s)G_d(s)[k_p + G_{RC}(s)]} \quad (4)$$

1.2 控制参数设计

图 3 展示了离散域下 RC 的核心结构^[31-32]。其中, z 为离散域变换算子, $Q(z)$ 用来提高系统的稳定性, 通常可选择为小于 1 的常数或低通滤波器, v_{IM} 为 RC 内模环节的输出。为了便于在 z 域下对系统进行分析和设计, 文中采用双线性变换法得到各环节的离散域传递函数。

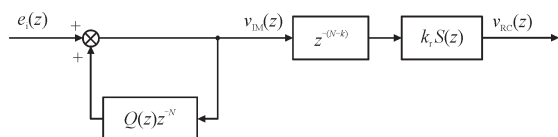


图3 重复控制器框图

Fig.3 Block diagram of repetitive controller

根据图 3 可得 RC 的传递函数 $G_{RC}(z)$ 为:

$$G_{RC}(z) = \frac{v_{RC}(z)}{e_i(z)} = \frac{k_r S(z) z^{-(N-k)}}{1 - Q(z) z^{-N}} \quad (5)$$

式中: N 为 1 个工频周期内的采样点数; k 为对相位进行超前补偿的拍数, k_r 为 RC 的增益; $S(z)$ 为对高频信号进行衰减的低通滤波器。

为了对控制参数进行设计, 表 1 给出了 GTC 主要的电路的关键参数。由于 RC 主要影响到各整数倍电网频率下的增益, 对系统开环伯德图的整体趋势影响较小, 即系统的快速性主要受 k_p 的影响, 因此选择 k_p 时可以忽略 RC 的影响。根据图 2 可得仅考虑比例环节时系统的开环传递函数 $G_{op}(z)$ 为:

$$G_{op}(z) = k_p G_d(z) P(z) \quad (6)$$

表1 GTC 电路参数

Table 1 Circuit parameters of GTC

项目	数值
V_g/V	220
开关频率 f_s/Hz	9 600
额定电流 I_g/A	50
L_f/mH	0.5
$C/\mu\text{F}$	2 820

对于电力电子变换器, 系统的开环穿越频率通常设置为开关频率的 1/10 以内^[33]。结合表 1 中的电路参数, 当 $k_p=3$ 时 $G_{op}(z)$ 的伯德图如图 4 所示, 此时系统的开环穿越频率为 930 Hz。

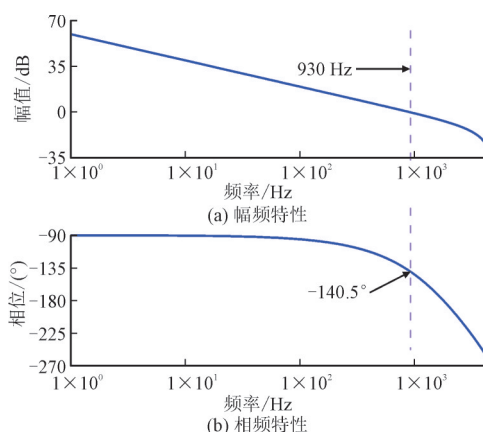


图4 $k_p=3$ 时 $G_{op}(z)$ 的伯德图

Fig.4 Bode plot of $G_{op}(z)$ at $k_p=3$

在 RC 中, $S(z)$ 通常设计为二阶低通滤波器, 其传递函数表达式同式(2)。由于文中 PWM 环节采用单极性倍频调制方式^[34], 输出电流纹波的频率为开关频率的 2 倍, 因此将 $S(z)$ 的截止频率设置在电流纹波频率的 1/10 附近, 选择为 2 kHz, 品质因数选择为 0.707。超前补偿环节 z^k 主要是补偿由 $S(z)$ 和 RC 的等效被控对象 $P_{eq}(z)$ 引入的相位滞后, $P_{eq}(z)$ 为图 2 中仅保留比例环节时 RC 输出端的作用点至输出电流的传递函数^[35], 可表示为:

$$P_{eq}(z) = \frac{G_d(z) P(z)}{1 + k_p G_d(z) P(z)} \quad (7)$$

为分析不同超前拍数的补偿效果, 图 5 给出了 $S(z)P_{eq}(z)$ 和 z^{-k} (k 取 1~5) 的相频特性。由图 5 可知, 当 $k=4$ 时, 二者相频特性的一致性最好, 因此选择 $k=4$ 。

将式(5)代入式(4), 并整理可得 RC 电路中电流误差与输出电流指令、电网电压的关系为:

$$\frac{e_i(z)}{i_o^*(z) + P(z)[1 - F(z)G_d(z)]v_g(z)} = \frac{1 - Q(z)z^{-N}}{1 + k_p G_d(z)P(z)} \cdot \frac{1}{1 - W(z)z^{-N}} \quad (8)$$

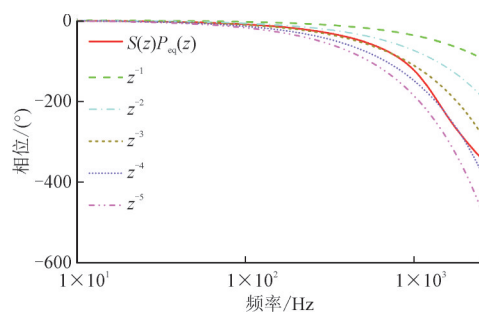

 图5 $S(z)P_{eq}(z)$ 和 z^{-k} 的相频特性

 Fig.5 Phase-frequency characteristics of $S(z)$, $P_{eq}(z)$ and z^{-k}

其中, $W(z)$ 为定义的中间表达式, 具体表示为:

$$W(z) = Q(z) - \frac{k_r G_d(z) P(z) S(z) z^k}{1 + k_p G_d(z) P(z)} \quad (9)$$

根据式(8)可得闭环系统的电流误差响应关系如图6所示。

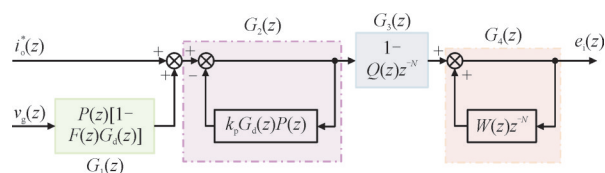


图6 电流误差响应

Fig.6 Current error response

由图6可知, 在由 $i_o^*(z)$, $v_g(z)$ 传递至 $e_i(z)$ 所经过的4个环节中, $G_1(z)$ 与控制器的参数无关, 仅包含与主电路、控制延时和电压采样滤波器有关的参数, 且不包含不稳定极点; 除 $G_1(z)$ 外, 剩余 $G_2(z) \sim G_4(z)$ 共3部分构成级联形式, 因此若要求整个 GTC 系统稳定, 则要求 $G_2(z) \sim G_4(z)$ 均稳定^[36]。其中, $G_2(z)$ 为1个负反馈环节, 其环路增益与图2中仅考虑比例环节时系统的开环传递函数相同, 如式(6)所示, 因此 $G_2(z)$ 的稳定性已在设计 k_p 时得到保证; 由 $G_3(z)$ 可知, 当 $Q(z)=1$ 时, 该环节的模为0, 此时 RC 可以完全消除稳态误差, 但 $Q(z)=1$ 会给系统的鲁棒性带来不利影响。因此综合考虑其对系统稳定性和稳态误差的影响, 通常选择 $Q(z)$ 为接近于1的常数或低通滤波器, 此处选择 $Q(z)=0.97$; 最后, 根据 $G_4(z)$ 设计 RC 的增益 k_r , 由图6分析可知, $G_4(z)$ 为1个高阶正反馈环节, 极点数量较多, 因此根据小增益定理得到使得 $G_4(z)$ 稳定的1个充分条件为^[36]:

$$|W(e^{j\omega T_s})| < 1 \quad 0 < \omega < \frac{\pi}{T_s} \quad (10)$$

式中: ω 为角频率。

根据式(9)可得不同 k_r 下 $W(e^{j\omega T_s})$ 的轨迹如图7所示。由图7可知, 满足 $G_4(z)$ 稳定的充分条件时, k_r 的最大取值为3.55。图8给出了不同 k_r 下 $G_4(z)$ 的闭环伯德图, 其幅值越小, 说明系统的跟踪精度高且

抗扰能力更强。由图8可知, 在 k_r 由0增大至1.8的过程中, 各频率下伯德图的幅值均逐渐减小; 但当 k_r 大于1.8时, 在800~1000 Hz 区间的幅值将增大。因此, 综合考虑系统对不同频段下信号的跟踪和抗扰能力, k_r 取1.8为最优值。

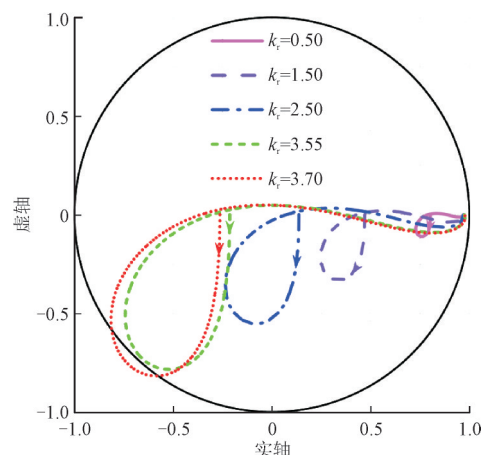

 图7 不同 k_r 下 $W(e^{j\omega T_s})$ 的轨迹

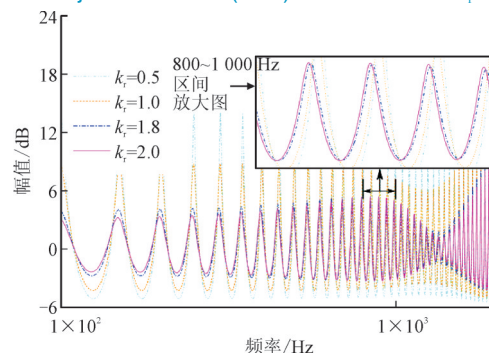
 Fig.7 Trajectories of $W(e^{j\omega T_s})$ under different k_r values

 图8 不同 k_r 下 $G_4(z)$ 的闭环伯德图

 Fig.8 Closed-loop Bode plots of $G_4(z)$ under different k_r values

2 基于积分分离思想的改进重复策略

2.1 暂态过程中输出电流周期性畸变的形成机理

为解决 RC 电路中暂态电流易出现周期性畸变问题, 关键是要弄清楚导致该问题的原因。为此, 根据图2导出输出电流给定至误差、比例控制器输出量和 RC 输出量的 z 域传递函数分别为:

$$\frac{e_i(z)}{i_o^*(z)} = \frac{1}{1 + G_d(z) P(z) [k_p + G_{RC}(z)]} \quad (11)$$

$$\frac{v_p(z)}{i_o^*(z)} = \frac{k_p}{1 + G_d(z) P(z) [k_p + G_{RC}(z)]} \quad (12)$$

$$\frac{v_{RC}(z)}{i_o^*(z)} = \frac{G_{RC}(z)}{1 + G_d(z) P(z) [k_p + G_{RC}(z)]} \quad (13)$$

根据式(11)~式(13)可得 e_i , v_p 和 v_{RC} 的阶跃响

稳态跟踪精度,对系统的暂态过程影响较小;而本文所提出的基于积分分离思想的改进重复策略,旨在优化重复控制的暂态响应性能,因此其同样适用于 $Q(z)$ 为低通滤波器的情况。

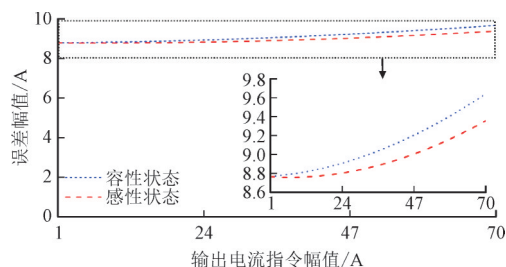


图11 不同状态下单比例控制时的稳态误差幅值
Fig.11 Steady-state error amplitude under single proportional control in different states

3 仿真实验

为验证基于积分分离思想 RC 的有效性,根据表 1 的电路参数及 1.2 节设计的控制参数,在 PLECS 中建立了电流控制器采用 RC 时 SVG 的仿真模型,死区时间为 $3 \mu\text{s}$ 。通过对比仿真,图 12 与图 13 分别给出了相同条件下采用传统 RC 与基于积分分离思想 RC 时的仿真结果。

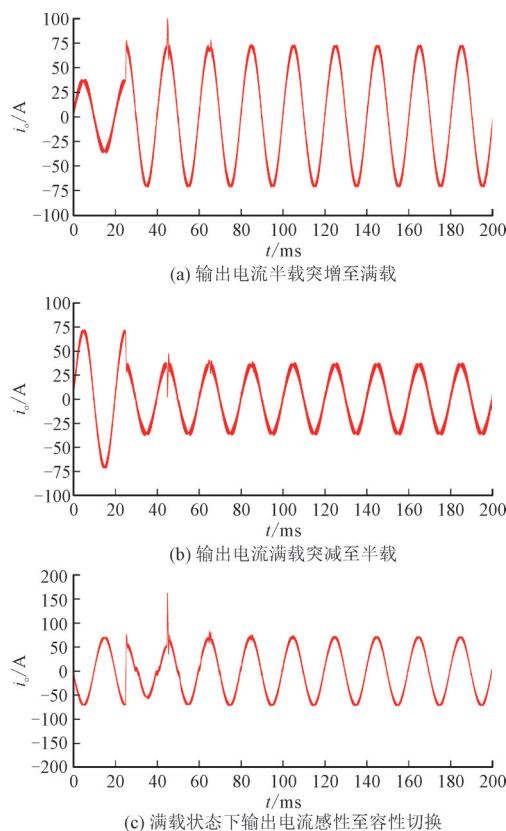


图12 传统RC不同工况下的仿真结果
Fig.12 Simulation results of traditional RC under different operating conditions

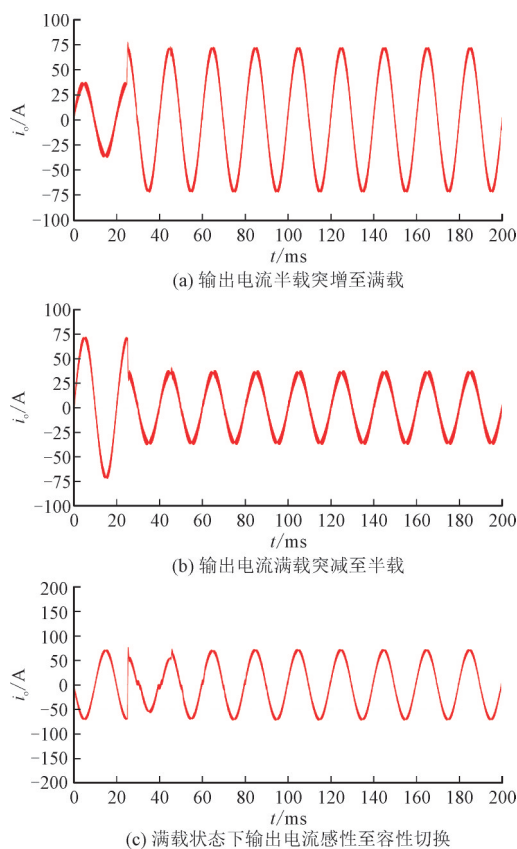


图13 基于积分分离思想RC不同工况下的仿真结果
Fig.13 Simulation results of RC with integral separation principle under different operating conditions

由图 12 和图 13 可知,使用传统 RC 时在不同工况下的暂态过程中输出电流均出现了明显的周期性畸变,在输出电流由半载突增至满载过程中周期性畸变所导致的最大电流为 100 A ;在满载状态下输出电流由感性切换至容性过程中的最大电流达到 160 A ;而引入基于积分分离思想 RC 后,暂态过程中输出电流的周期性畸变得到了显著的抑制。此外,进一步对比 2 种策略下输出电流的暂态响应波形可以发现,与传统 RC 相比,基于积分分离思想 RC 在对暂态过程中输出电流周期性畸变进行改善的同时不会影响到系统的快速性。仿真结果验证了基于积分分离思想 RC 在抑制暂态大偏差工况下输出电流周期性畸变的有效性。

4 实验验证

为进一步验证改进 RC 策略的有效性,搭建了与仿真参数一致的 SVG 实验系统,如图 14 所示。实验系统控制算法由 TMS320F28335 实现,电网电压和输出电流采样分别采用 LV25-P 和 LAH50-P 互感器。传统 RC 和基于积分分离思想 RC 时实验

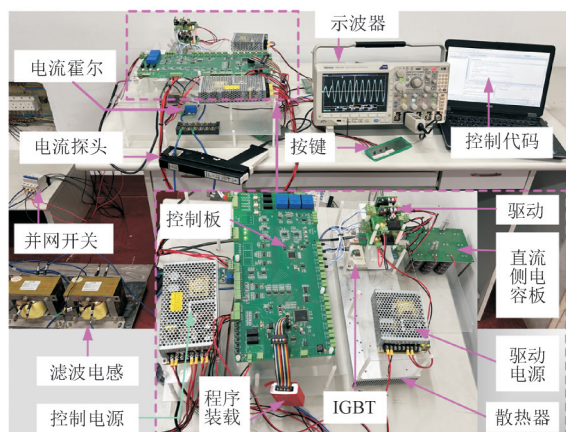


图14 SVG实验系统

Fig.14 Experimental system of SVG

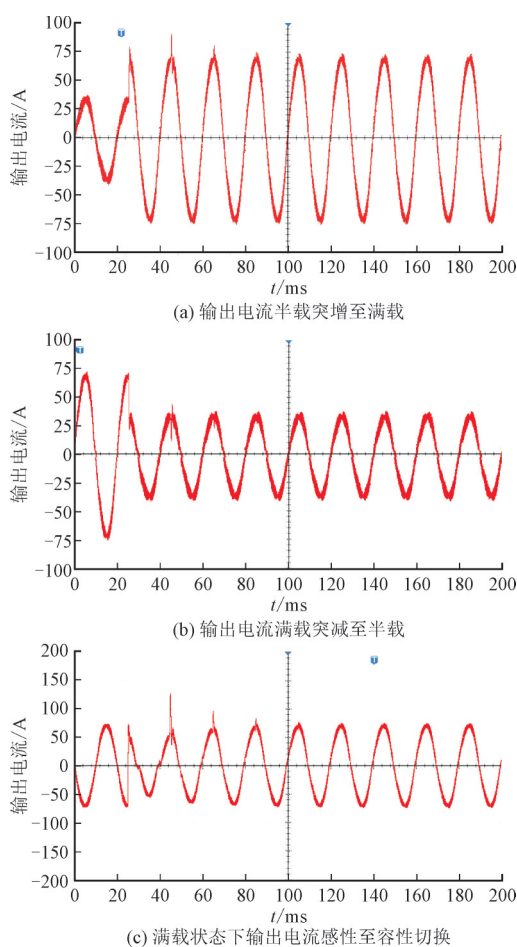
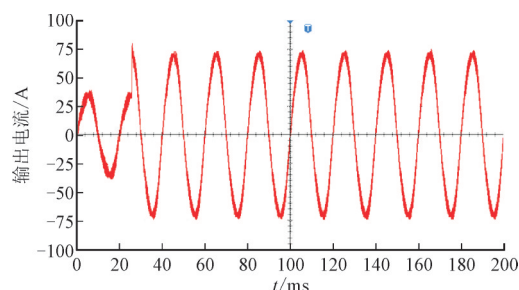


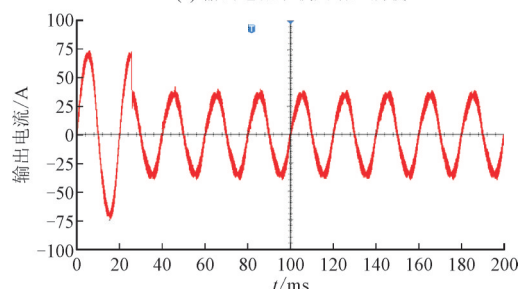
图15 传统RC不同工况下的实验结果

Fig.15 Experiment results of traditional RC under different operating conditions

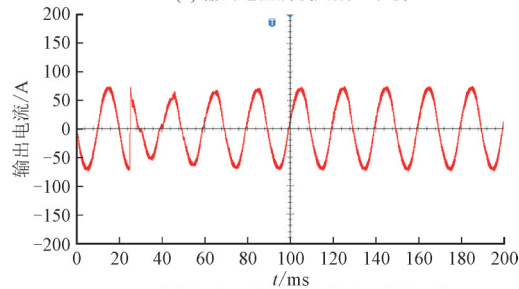
结果分别如图15和图16所示。由图15和图16可知,传统RC下输出电流由半载突增至满载过程中由周期性畸变导致的最大电流为90 A,在满载状态下输出电流由感性切换至容性过程中的最大电流达到130 A,这会给系统带来较大冲击甚至触发装置过电流保护。在基于积分分离思想的RC策略



(a) 输出电流半载突增至满载



(b) 输出电流满载突减至半载



(c) 满载状态下输出电流感性至容性切换

图16 基于积分分离思想RC不同工况下的实验结果

Fig.16 Experimental results of RC with integral separation principle under different operating conditions

下,各暂态工况下输出电流的周期性畸变基本得到完全抑制,并且系统的快速性未受到影响。实验结果与仿真结果一致,进一步验证了基于积分分离思想RC在抑制暂态大偏差工况下输出电流周期性畸变的有效性。本文虽然以SVG为例对所提策略的有效性进行了验证,但该策略也适用于PWM整流器或逆变器形式的变流器。

5 结论

本研究针对RC控制下暂态大偏差工况下输出电流周期性畸变问题,分析其机理,提出一种基于积分分离的改进RC控制策略及误差阈值设计方法,并通过仿真与实验验证策略在不同暂态工况下的有效性。主要结论如下:

1) 电流周期性畸变源于比例与RC环节响应速度差异。指令突变时,RC内模输出虽即时更新,但其控制作用延迟1个工频周期生效,此时误差已减小,反而引入扰动。

2)采用误差阈值管理 RC 内模更新(误差超阈值时暂停),可显著改善畸变。阈值设计需参考单一比例控制的稳态误差。

3)所提改进策略在抑制畸变的同时,不影响系统快速响应性能。

参考文献

- [1] 石磊,周宏涛,赵元莘,等. 光伏多功能并网逆变器迭代SMC+LADRC电流内环控制策略研究[J]. 智慧电力,2023,51(4):107-114.
SHI Lei, ZHOU Hongtao, ZHAO Yuanshen, et al. Iterative SMC+LADRC current inner loop control strategy of photovoltaic multi-function grid connected inverter[J]. Smart Power, 2023, 51(4): 107-114.
- [2] 刘普,崔艺博,刘兆峰,等. 基于阻抗分析法的并网变流器稳定性统一分析方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(4):114-125.
LIU Pu, CUI Yibo, LIU Zhaofeng, et al. The unified analysis method of grid-connected converter stability based on impedance analysis[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 114-125.
- [3] 张开宇,郑佳雯,时珊珊,等. 轨道交通柔性交流牵引供电系统无源一致性稳定控制方法[J]. 智慧电力,2024,52(7):119-127.
ZHANG Kaiyu, ZHENG Jiawen, SHI Shanshan, et al. Passivity-consensus-based control method for flexible AC traction power supply systems of rail transit[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 119-127.
- [4] 高波,何福长,韩建,等. 计及频率耦合的单相光伏变流器谐波潮流分析模型[J]. 电力科学与技术学报,2024,39(5):216-225.
GAO Bo, HE Fuchang, HAN Jian, et al. Analysis model of harmonic power flow for single-phase photovoltaic converters considering frequency coupling[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 216-225.
- [5] 金衍珍,林丽,戴哲仁,等. 一种提高数字控制LCL型并网逆变器对电网阻抗鲁棒性的补偿策略[J]. 智慧电力,2024,52(4):108-115.
JIN Yanzhen, LIN Li, DAI Zheren, et al. A compensation strategy enhancing robustness of digital controlled LCL grid-connected inverter to grid impedance[J]. Smart Power, 2024, 52(4): 108-115.
- [6] 黄鹭鹭,高波,孙丽敬. 电网支持型变流器输出建模、控制及稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(4):44-53.
HUANG Lulu, GAO Bo, SUN Lijing. Analysis of modeling, control and stability for grid-supporting power converters[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 44-53.
- [7] 张树全,戴珂,谢斌,等. 多同步旋转坐标系下指定次谐波电流控制[J]. 中国电机工程学报,2010,30(3):55-62.
ZHANG Shuquan, DAI Ke, XIE Bin, et al. Selective harmonic current control based on multiple synchronous rotating coordinates[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 55-62.
- [8] 谈竹奎,文贤旭,杨涛,等. 面向新型电力系统的双馈风力发电机并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(3):181-187.
TAN Zhukui, WEN Xiankui, YANG Tao, et al. A grid-connected control strategy for doubly-fed wind turbines for new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 181-187.
- [9] 李慧,李珠林,刘思嘉,等. 基于双补偿下垂-MQPR的直驱式风电机组并网控制[J]. 电力科学与技术学报,2024,39(3):142-149.
LI Hui, LI Zhulin, LIU Sijia, et al. Grid-connected control of direct-driven permanent magnet wind turbine based on dual compensation droop and multiple quasi-proportional-resonances[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 142-149.
- [10] LU C J, ZHOU B, MENG F S, et al. Control scheme based on improved odd-harmonic repetitive control for third-harmonic injection two-stage matrix converter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(4): 3839-3852.
- [11] ZHAO Y, XIE C, PENG C, et al. Passivity-based design of frequency adaptive repetitive controller for LCL-type grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(4): 4017-4028.
- [12] 章晓龙,胡浩,傅晓帆,等. LLCL型并网逆变器二阶高增益重复控制[J]. 智慧电力,2024,52(12):27-34.
ZHANG Xiaolong, HU Hao, FU Xiaofan, et al. Second-order higher gain repetitive control for LLCL-type grid-connected inverters[J]. Smart Power, 2024, 52(12): 27-34.
- [13] ZOU Z X, ZHOU K L, 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.
- [14] LIU P, WANG C, ZHANG Y W, et al. Frequency adaptive repetitive control of new energy grid-connected inverter based on improved IIR[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(8): 9539-9551.
- [15] 宫金武,查晓明,陈佰峰. 一种快速重复控制策略在APF中的实现和分析[J]. 电工技术学报,2011,26(10):110-117.
GONG Jinwu, ZHA Xiaoming, CHEN Baifeng. Analysis and realization of a fast repetitive controller in active power filter system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 110-117.
- [16] 郑远辉,杨苹,王月武,等. 基于重复控制的有源电力滤波器 $6k \pm 1$ 次谐波补偿[J]. 电力系统自动化,2016,40(16):125-131.
ZHENG Yuanhui, YANG Ping, WANG Yuewu, et al. Repetitive control based compensation for $6k \pm 1$ harmonics of active power filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 125-131.
- [17] LU W Z, ZHOU K L, WANG D W, et al. A generic digital $nk \pm m$ -order harmonic repetitive control scheme for PWM converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3): 1516-1527.
- [18] 赵强松,陈昊,王启帆,等. 微电网并网逆变器频率自适应前馈双模重复-比例控制[J]. 电工技术学报,2024,39(15):4843-4855.
ZHAO Qiangsong, CHEN Hao, WANG Qifan, et al. Frequency adaptive feedforward dual-mode repetitive control and proportional control for grid-connected inverters in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4843-4855.
- [19] ZHU M Z, YE Y Q, XIONG Y K, et al. Parameter robustness improvement for repetitive control in grid-tied inverters using an

- IIR filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7):8454-8463.
- [20] 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.
- 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.
- [21] CHEN S N, YE Y Q. H_{∞} active damping filter design for LCL-type grid-tied inverter under additive and multiplicative perturbations[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(9):11294-11304.
- [22] 丁劲松,姚鸿德,李圣清.弱电网下LCL型并网逆变器输出阻抗复合重塑策略[J].电网与清洁能源,2024,40(3):32-40.
- DING Jinsong, YAO Hongde, LI Shengqing. A study on the complex remodeling strategy of output impedance of LCL-type grid-connected inverters under weak grids[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(3):32-40.
- [23] 高子鹏,肖国春,田圆媛,等.考虑频率耦合的并网逆变器不同域控制的稳定性比较[J].电力系统保护与控制,2023,51(15):22-32.
- GAO Zipeng, XIAO Guochun, TIAN Yuanyuan, et al. Stability comparison of grid-connected inverters controlled in different domains considering frequency coupling[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15):22-32.
- [24] 顾钰婷,颜文旭,倪宏宇,等.LCL型光伏并网逆变器频率自适应控制系统设计[J].电子设计工程,2024,32(11):60-64,70.
- GU Yuting, YAN Wenxu, NI Hongyu, et al. Design of frequency adaptive control system for LCL grid-connected photovoltaic inverter[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(11):60-64, 70.
- [25] 刘昊,方天治,张惠丽,等.弱电网下应对复杂稳定性问题的并网逆变器改进电压前馈通路研究[J].电工技术学报,2024,39(16):4955-4967.
- LIU Hao, FANG Tianzhi, ZHANG Huili, et al. Research on an improved voltage feedforward path of grid-connected inverter coping with complex stability issues in weak grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16):4955-4967.
- [26] 李元昊,王新环,李孟奇.基于新型锁相环下并网逆变器的优化控制策略[J].供用电,2024,41(9):107-116.
- LI Yuanhao, WANG Xinhuan, LI Mengqi. Optimal control strategy of grid connected inverters based on a novel phase-locked loop[J]. Distribution Utilization, 2024, 41(9):107-116.
- [27] 袁梦瞳,薄耀龙,夏杨红,等.并网变流器小信号稳定性解析解[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):234-244.
- YUAN Mengtong, BO Yaolong, XIA Yanghong, et al. Analytical solution for small signal stability of grid-connected converter[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4):234-244.
- [28] LIN Z H, RUAN X B, ZHANG H, et al. A hybrid-frame control based impedance shaping method to extend the effective damping frequency range of the three-phase adaptive active damper[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(1):509-521.
- [29] 李志军,贾杨,张家安.基于自适应虚拟电阻的广域有源阻尼器[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2023,56(7):755-766.
- LI Zhijun, JIA Yang, ZHANG Jia'an. Wide-area active damper with adaptive virtual resistance[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2023, 56(7):755-766.
- [30] LIU Z P, LIU J J, LIU Z. Analysis, design, and implementation of impulse-injection-based online grid impedance identification with grid-tied converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(12):12959-12976.
- [31] YANG Y, YANG Y, HE L Q, 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.
- [32] 钱为,刘洪德,吴扣林,等.适用于兆瓦级多模块变流器的新型有源阻尼控制设计方法[J].分布式能源,2025,10(3):23-30,41.
- QIAN Wei, LIU Hongde, WU Koulin, et al. A novel control design method of active damping for mul-ti-module converter at megawatt level[J]. Distributed Energy, 2025, 10(3):23-30, 41.
- [33] ERICKSON R W, MAKSIMOVIC D. Fundamentals of power electronics[M]. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [34] 张贞艳,仲伟松.级联H桥型多电平逆变器的CPS-SPWM调制策略研究[J].电网与清洁能源,2015,31(10):44-49,54.
- ZHANG Zhenyan, ZHONG Weisong. Research on the CPS-SPWM modulation strategy used in multilevel inverter based on cascade H-bridge[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(10):44-49, 54.
- [35] REN L T, WANG F, SHI Y J, et al. Coupling effect analysis and design principle of repetitive control based hybrid controller for SVG with enhanced harmonic current mitigation[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(5):5659-5669.
- [36] HAN B, BAI C, LEE J S, et al. Repetitive controller of capacitor-less current-fed dual-half-bridge converter for grid-connected fuel cell system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(10):7841-7855.
- [37] 欧阳泽华,李学明,张亮,等.车用永磁同步电机控制器系统开发与实现[J].电子设计工程,2023,31(21):87-92,98.
- OUYANG Zehua, LI Xueming, ZHANG Liang, et al. Design and implementation of permanent magnet synchronous motor controller system for vehicler[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(21):87-92, 98.
- [38] 吴彬彬,李彦.钻井船柴油发电机转速控制的研究[J].电子设计工程,2016,24(6):74-76.
- WU Binbin, LI Yan. Research on the speed control of drilling ship diesel engine generator[J]. Electronic Design Engineering, 2016, 24(6):74-76.
- [39] 蒋珏,陈国真,蒋炯炜.永磁同步电机模糊自适应控制系统的设计[J].电子设计工程,2022,30(13):11-15,22.
- JIANG Yan, CHEN Guozhen, JIANG Jiongwei. Design of fuzzy adaptive control system for permanent magnet synchronous motor[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(13):11-15, 22.

(责任编辑 杨海波)

收稿日期:2025-05-07; 修改日期:2025-08-15

作者简介:杨树德(1986),男,河南驻马店人,博士,讲师,研究方向为可再生能源发电系统并网控制及稳定性分析。E-mail: yangshude@yzu.edu.cn