

基于模糊 PCI 与 PR 控制的三相 LC 型 并网逆变器控制策略

杨旭红¹, 郭 凯², 杨峰峰¹, 薛 冰¹, 王闾姝¹

(1. 上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090; 2. 国网山东省电力有限公司滨州供电公司, 山东 滨州 256600)

摘 要:针对传统 PI 控制交流信号时的局限性, 提出模糊 PCI 控制, 并与 PR 控制并联以直接控制三相逆变器并网。其中模糊 PCI 控制可以在给定条件下消除交流稳态误差, 并根据误差的大小和变化率对 PCI 控制器的比例参数和积分参数进行在线调整。同时利用 PR 控制在谐振频率处具有无穷大增益的优势, 使系统满足并网要求。该新型复合控制策略可以较好地控制交流量, 能直接应用于三相 ABC 坐标系, 省去坐标变化环节, 节约逆变器控制系统成本。最后通过 MATLAB/Simulink 仿真平台, 建立 LC 型滤波的逆变器并网模型, 仿真分析证明了该控制策略的可行性。

关 键 词:逆变器并网; 模糊 PCI 控制; 模糊 PCI 与 PR 复合控制; 参数在线调整

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.003 中图分类号: TM727 文章编号: 1673-9140(2020)05-0020-07

A control strategy of grid-connected inverter with three-phase LC filter based on fuzzy PCI and PR control

YANG Xuhong¹, GUO Kai², YANG Fengfeng¹, XUE Bing¹, WANG Tianshu¹

(1. College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Binzhou Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Co., Ltd., Binzhou 256600, China)

Abstract: The traditional PI control of AC signal results a certain steady state error commonly. Under this background, a new strategy is proposed based on the fuzzy PCI control which is in parallel with a PR control. It controls the grid-connect process of the three-phase inverter directly. The fuzzy PCI control can eliminate the steady-state error under given conditions and track AC control variables accurately. The PCI proportional coefficients and ratio coefficient are adjusted online according to error and error rate. In view of the advantage PR control which has an infinite gain at the resonant frequency, the PR control is added to make the system meet the requirements of the grid-connected. The proposed compound control strategy can be utilized to control the AC signal and can be directly applied to the three-phase ABC coordinate system without a coordinate change. The cost of the inverter control system is saved. Lately, a model of grid-connected inverter with LC filter is established on MATLAB/Simulink and the feasibility of the strategy is verified.

Key words: grid-connected inverter; fuzzy PCI control; fuzzy PCI and PR control; online adjustment

收稿日期: 2017-04-12; 修回日期: 2018-07-11

基金项目: 上海市重点科技攻关计划(上海市科委地方院校能力建设项目)(14110500700); 国家自然科学基金(61203224); 上海自然科学基金(13ZR1417800)

通信作者: 杨旭红(1969-), 女, 博士, 教授, 主要从事新能源电网控制技术、核电和火电机组的仿真及控制技术研究; E-mail: yangxuhong.sh@163.com

近年来,随着世界能源供应日趋紧张,人们越来越重视风能和太阳能等可再生能源的开发与利用,分布式并网发电是利用太阳能和风能等新能源的主流方式。并网逆变器是连接分布式电源和电网的主要接口,其控制性能的好坏十分重要^[1-6]。文献[7]指出分布式电源发电的随机性和供电不确定性会导致微网谐波的存在,进而会影响并网之后电能的可靠性,故解决谐波问题对于实现可靠并网至关重要。

目前国内外学者对于并网逆变器控制策略的研究主要集中于电压控制型和电流控制型 2 种,该文主要分析电流控制型。电流控制型并网逆变器的控制方式主要有比例积分(PI)控制、比例复数积分(PCD)控制、比例谐振(PR)控制、模糊控制以及重复控制等。每种控制方式各有优缺点,其中文献[8]指出 PI 控制简单且易实现、动态响应快、鲁棒性强,但是控制交流量时存在稳态误差;文献[9]指出理想的 PR 控制在交流频率处增益无穷大,可以完全消除稳态误差;文献[10]指出 PCI 控制将传统 PI 控制推广至复数域,能够较好地直接控制交流量。

现阶段对于控制直流量的复合控制策略研究较多,比如 PI+重复复合控制和 PR+重复复合控制等。该文主要研究对于交流量的控制方法,提出模糊 PCI 与 PR 并联复合的新型控制策略,其中模糊控制具有较强的鲁棒性和自适应能力,与 PCI 组成模糊 PCI 控制器,可以实时在线调整 PCI 控制器的比例增益和积分增益。同时将模糊 PCI 控制器与 PR 控制器并联组成新型复合控制器,一是利用 PR 控制在谐振频率处增益无穷大的特点,实现对交流控制量的无静差跟踪;二是利用 PR 控制响应速度快的特点,减轻加入模糊控制而拖慢整个控制器响应速度的负面影响。最后通过理论和仿真分析,验证该新型复合控制策略的可行性与正确性。

1 三相 LC 型并网逆变器主电路和工作原理

三相 LC 并网逆变器的一般拓扑结构如图 1 所示,其中 U_{dc} 为理想直流电源,该文用来等效光伏和风电等新能源发电; I_A 、 I_B 、 I_C 为三相并网电流;

I_{LA} 、 I_{LB} 、 I_{LC} 为三相滤波电感电流; I_{CA} 、 I_{CB} 、 I_{CC} 为三相滤波电容电流; U_{invA} 、 U_{invB} 、 U_{invC} 为三相逆变器输出侧电压, U_{sA} 、 U_{sB} 、 U_{sC} 为三相电网电压。该文采用 PWM 信号来触发调制三相并网逆变器,进而将新能源直流电压逆变成三相交流电压。这样一来,电路输出电压在开关频率处会产生较多谐波,为减少谐波,该文选取 LC 型滤波器进行滤波,使并网电流谐波畸变率达到相关国家标准,其中 L 为逆变器侧滤波电感, R 为电感侧电阻, C 为滤波电容。

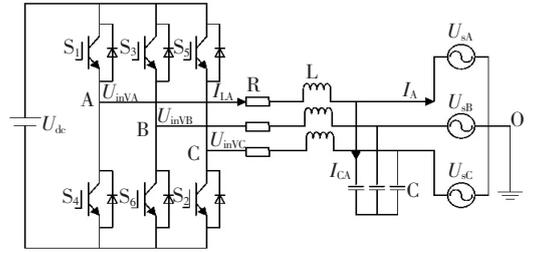


图 1 并网逆变器拓扑结构

Figure 1 The topology of grid-connected inverter

根据基尔霍夫定律,由图 1 所示并网逆变器拓扑结构,可得三相静止 ABC 坐标系下并网逆变器的电压和电流数学模型:

$$\begin{cases} U_{invA} = RI_{LA} + L \frac{dI_{LA}}{dt} + U_{sA} \\ U_{invB} = RI_{LB} + L \frac{dI_{LB}}{dt} + U_{sB} \\ U_{invC} = RI_{LC} + L \frac{dI_{LC}}{dt} + U_{sC} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_{LA} = I_{CA} + I_A \\ I_{LB} = I_{CB} + I_B \\ I_{LC} = I_{CC} + I_C \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} I_{CA} = C \frac{dU_{sA}}{dt} \\ I_{CB} = C \frac{dU_{sB}}{dt} \\ I_{CC} = C \frac{dU_{sC}}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

该文主要探求对于三相并网交流电流量的直接最优化控制方法,控制策略:首先取三相并网电流 I_A 、 I_B 、 I_C 与其对应各相参考电流 I_A^* 、 I_B^* 、 I_C^* 的差值,获得交流误差信号 e_{ix} (x 可以分别指代 ABC 三相);然后 e_{ix} 经模糊 PCI 与 PR 并联组成新型复

合控制器,获取 PWM 触发调制信号;最后经 PWM 调制驱动三相并网逆变器工作。图 2 所示为某一相简化控制流程,另外两相与此相同。

LC 滤波器为被控对象,由电路学知识可得被控对象传递函数^[11]为

$$G_p(s) = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

式中 ω_n 为系统自然频率, $\omega_n = 1/\sqrt{LC}$; ξ 为阻尼比, $\xi = R/2\sqrt{C/L}$ 。

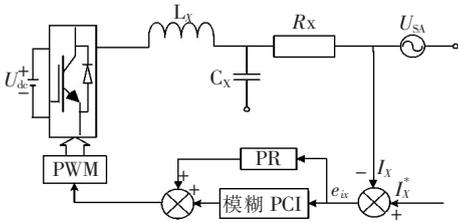


图 2 单相并网逆变器系统控制

Figure 2 The control diagram of single phase grid-connected inverter system

2 模糊 PCI 控制器设计

PCI 控制基于复数域,可以有效消除并网交流电流控制时的稳态误差^[12]。该文采用一种适用于三相静止 ABC 坐标系下的 PCI 控制器,传递函数为

$$G_{\text{PCI}}(s) = K_p + \frac{K_i}{s - j\omega_0} \quad (5)$$

式中 k_p 为比例增益; k_i 为积分增益; ω_0 为给定交流频率,且 $\omega_0 = 314 \text{ rad/s}$ 。由式(2)可知,在给定交流频率处增益无穷大,故可以无静差跟踪交流变量。

基于传统 PCI 控制,该文提出模糊 PCI 控制策略,如图 3 所示的模糊 PCI 控制器主要应用各相量之间幅值以及相角关系,直接应用于三相 ABC 坐标系,无需再经 Clark 变换以及反变换^[13-14]。

模糊 PCI 控制能够实现比例增益 k_p 和积分增益 k_i 的实时在线调整,其工作原理主要是:首先经模糊控制器确定 PCI 控制器的比例增益变化量 Δk_p 和积分增益变化量 Δk_i ,然后分析并网逆变器传递函数,确定单一 PCI 控制时的 k'_p 和 k'_i ,最后对应数值相加,实时在线调整 PCI 控制器的 k_p 和 k_i 值。该文选取的模糊规则如表 1 所示。

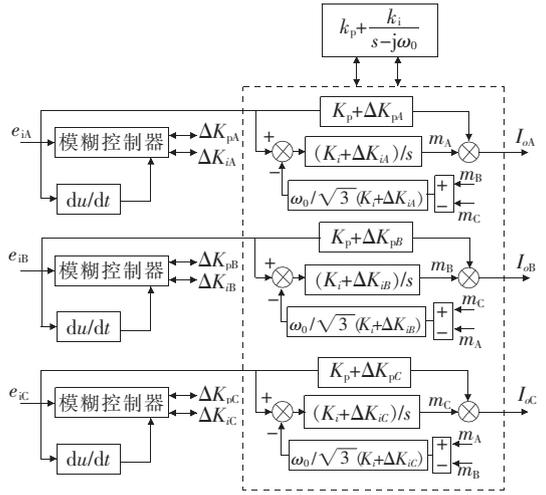


图 3 模糊 PCI 控制器

Figure 3 The fuzzy PCI controller

表 1 Δk_p 和 Δk_i 的模糊控制规则

Table 1 The fuzzy control rules of Δk_p and Δk_i

EC	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PM/NM	PS/NS	ZO/ZO	ZO/ZO
NM	PB/NB	PB/NB	PM/NM	PS/NS	PS/NS	ZO/ZO	NS/ZO
NS	PM/NB	PM/NM	PM/NS	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS	NS/PS
ZO	PM/NM	PM/NM	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS	NM/PM	NM/PM
PS	PS/NM	PS/NS	ZO/ZO	NS/PS	NS/PS	NM/PM	NM/PB
PM	PS/ZO	ZO/ZO	NS/PS	NM/PS	NM/PM	NM/PB	NB/PB
PB	ZO/ZO	ZO/ZO	NM/PS	NM/PM	NM/PM	NB/PB	NB/PB

3 新型复合控制器设计

PR 控制基于内膜原理,其传递函数为

$$G_{\text{PR}}(s) = K_{p1} + \frac{K_r s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (6)$$

式中 k_{p1} 为 PR 控制比例增益; k_r 为谐振参数; ω_0 为谐振频率, $\omega_0 = 314 \text{ rad/s}$,该值与 PCI 给定交流频率相同。对于 PR 控制器而言,将 ω_0 带入式(3)可知控制器的幅频特性趋向无穷大,故 PR 控制可以实现交流控制的零稳态误差,同时具有抗电网电压干扰的良好性能^[15]。

该文在分析模糊 PCI 控制与 PR 控制的基础上,提出模糊 PCI 与 PR 并联复合的新型控制策略,应用模糊控制实时在线调整 PCI 控制器参数,同时与 PR 控制并联,发挥 2 种控制策略的优越性,实现并网逆变器的稳定控制。应用该文提出的新型复合

控制策略时,无需进行坐标变换,进而可以省去锁相环,节约成本,提高稳定性。模糊 PCI 与 PR 并联复合控制结构如图 4 所示。

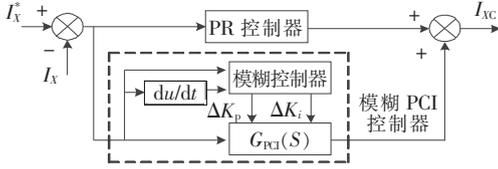


图 4 模糊 PCI 与 PR 并联复合控制结构

Figure 4 The structure of fuzzy PCI and PR parallel compound control

4 新型复合控制器参数设计

对于三相逆变并网系统而言,其控制系统模型如图 5 所示。

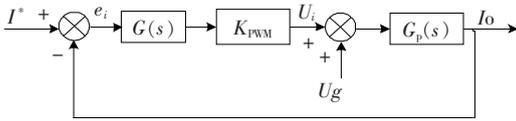


图 5 并网逆变控制系统模型

Figure 5 The model of grid-connected inverter system

其中: $I^*(s)$ 为参考量, $I_o(s)$ 为输出量, $U_g(s)$ 为扰动量, K_{PWM} 为 PWM 等效增益, $G(s)$ 为控制器传递函数, $G_p(s)$ 为被控对象传递函数。PCI 控制与 PR 控制并联复合时,复合控制器传递函数为

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s - j\omega_0} + K_{p1} + \frac{K_r s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (7)$$

对式(7)进行分析可知,复合控制器传递函数还可表示为

$$G(s) = K_p + K_{p1} + \frac{(K_i + K_r)s + jK_i\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} \quad (8)$$

对应幅频特性为

$$|G(s)| = \left| K_p + K_{p1} + \frac{(K_i + K_r)s + j\omega_0 K_i}{-s^2 + \omega_0^2} \right|_{s=j\omega_0} \quad (9)$$

由式(9)可知,当 $s = j\omega_0$ 时,闭环传递函数趋于无穷大,故可知该文提出的新型复合控制器可直接应用于三相 ABC 坐标系,直接控制交流变量。

并联复合时控制器参数设计较为复杂,为减少计算量,该文将 PCI 控制器与 PR 控制器分开设计,分别确定参数值。

首先对于 PCI 控制器,该文通过对其闭环传递函数的幅频特性进行数值分析,初步确定比例增益和积分增益^[16]。PCI 控制闭环传递函数为

$$D(s) = \frac{I_o(s)}{I^*(s)} = \frac{A_1 s + A_0}{B_3 s^3 + B_2 s^2 + B_1 s + B_0} \quad (10)$$

$$\text{其中} \quad \begin{cases} A_1 = K_{PWM} K_p \\ A_0 = K_{PWM} K_i - j\omega_0 K_{PWM} K_p \end{cases}$$

$$[B_3 = LC$$

$$B_2 = RC - j\omega_0 LC$$

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= K_{PWM} K_p + 1 + j\omega_0 RC \\ B_0 &= K_{PWM} K_i - j\omega_0 (1 + K_{PWM} K_p) \end{aligned} \right\}$$

进一步求得 PCI 控制的闭环幅频特性为

$$|D(s)| = \frac{K_{PWM} \sqrt{K_i^2 + K_p^2 (\omega - \omega_0)^2}}{\sqrt{C_1^2 + C_2^2 (\omega - \omega_0)^2}} \quad (11)$$

$$\text{其中} \quad \begin{cases} C_1 = K_{PWM} K_i + RC\omega\omega_0 - RC\omega^2 \\ C_2 = LC\omega^2 - K_{PWM} K_p - 1 \end{cases}$$

该文选取系统带宽 $f_b = 650$ Hz,即 $\omega_b = 4\,082$ rad/s,由系统带宽的定义,取 $20 \lg |D(s)|_{s=j\omega_b} = -3$,初步计算 PCI 控制器参数。

然后对于 PR 控制器,该文首先分析其闭环传递函数特性,再利用极点配置法来初步设计相关参数^[17]。PR 控制闭环传递函数为

$$T(s) = \frac{I_o(s)}{I^*(s)} = \frac{M_2 s^2 + M_1 s + M_0}{N_4 s^4 + N_3 s^3 + N_2 s^2 + N_1 s + N_0} \quad (12)$$

其中

$$[M_2 = K_{PWM} K_{p1}$$

$$\left\{ \begin{aligned} M_1 &= K_{PWM} K_r \\ M_0 &= K_{PWM} K_{p1} \omega_0^2 \end{aligned} \right.$$

$$[N_4 = LC$$

$$N_3 = RC$$

$$\left\{ \begin{aligned} N_2 &= K_{PWM} K_{p1} + LC\omega_0^2 + 1 \\ N_1 &= K_{PWM} K_r + RC\omega_0^2 \\ N_0 &= (K_{PWM} K_{p1} + 1)\omega_0^2 \end{aligned} \right.$$

$$[N_0 = (K_{PWM} K_{p1} + 1)\omega_0^2$$

进而可知系统特征方程为

$$H(s) = N_4 s^4 + N_3 s^3 + N_2 s^2 + N_1 s + N_0$$

此时该闭环系统为 4 阶系统,需进行降阶处理,再利用极点配置法确定控制器参数。

$$T'(s) = \frac{I_0(s)}{I^*(s)} = \frac{D_2(s^2 + D_1s + D_0)}{s^4 + E_3s^3 + E_2s^2 + E_1s + E_0} \quad (13)$$

其中

$$D_2 = \frac{M_2}{N_4}, D_1 = \frac{M_1}{M_2}, D_0 = \frac{M_0}{M_2}$$

$$E_3 = \frac{N_3}{N_4}, E_2 = \frac{N_2}{N_4}, E_1 = \frac{N_1}{N_4}, E_0 = \frac{N_0}{N_4}$$

消除零极点后有

$$T''(s) = \frac{I_0(s)}{I^*(s)} = \frac{D_2}{s^2 + F_1s + F_0} \quad (14)$$

对应极点配置下的系统特征方程为

$$H''(s) = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2$$

进而可得 $F_1 = 2\xi\omega_n$, $F_0 = \omega_n^2$, 式中 ξ 为阻尼比, ω_n 为设计的期望频率。同时,整理得

$$F_1 = E_3 - D_1 = \frac{R}{L} - \frac{K_r}{K_{p1}} \quad (15)$$

$$F_0 = E_2 - D_0 - F_1 D_1 = \frac{K_{\text{PWM}} K_{p1} + LC\omega_0^2 + 1}{LC} - \frac{K_r R}{K_{p1} L} + \frac{K_r^2}{K_{p1}^2} - \omega_0^2 \quad (16)$$

根据以上分别针对 PCI 控制和 PR 控制的分析,按照上述方程,结合极点配置法,将 LC 滤波参数值考虑在内,初步计算 PR 控制器的相关参数。

5 仿真结果分析

国家标准(GB/T 14549—1993)明确规定:并网电流总谐波畸变率 $\leq 5\%$ 时,新能源发电允许并网运行。为探究该文所提出的模糊 PCI 控制与 PR 控制并联的新型复合控制策略的可行性,在 MATLAB/Simulink 仿真环境中分别搭建相关仿真模型,对并网控制策略进行对比仿真验证。整个仿真过程严格参照 2 种控制器的参数设计理论和计算结果,然后进行一定程度的微调,得到 PCI 控制器参数为 $k_p' = 0.5$, $k_i' = 25$; PR 控制器的参数 $k_{p1} = 0.5$, $k_r = 1$ 。仿真模型基本参数如表 2 所示。

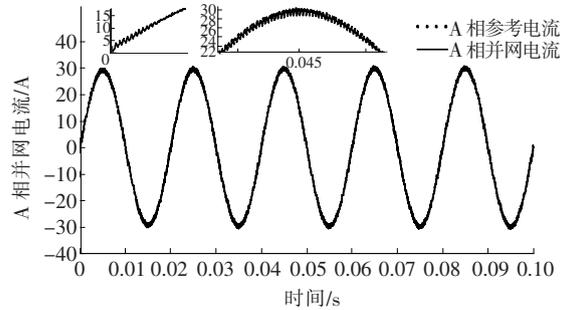
图 6 所示为新型复合控制策略下 ABC 三相并网电流波形,通过与对应相参考电流比较分析,可见 A 相并网电流几乎与其参考电流完全同步, B 相和 C 相并网电流则约在 1/12 周期后实现同步追踪。图 7 所示为新型控制策略下 A 相电网电压并网电

流波形,可见 A 相并网电流与电网电压几乎同相,实现了同步并网,满足单位功率并网要求。

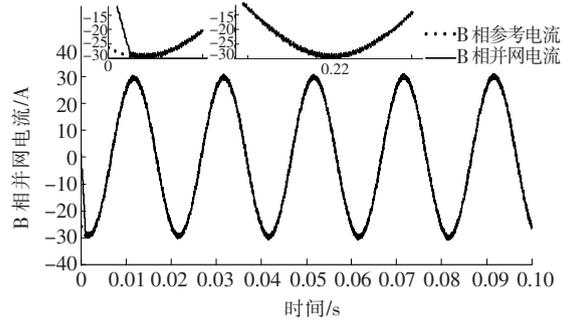
表 2 仿真模型基本参数

Table 2 The basic parameters of simulation model

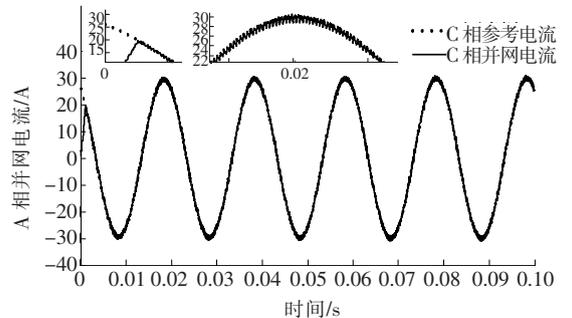
参数名称	单位	参数值
电网电压有效值 V_s	V	311
直流电压 U_{dc}	V	700
开关频率 f_s	kHz	10
电网频率 f	Hz	50
滤波电感 L	mH	3.52
滤波电容 C	μF	20
线路等效电阻 R	Ω	0.25
A 相参考电流 I_A^*	A	$30 \sin(100\pi t)$
B 相参考电流 I_B^*	A	$30 \sin(100\pi t - 2\pi/3)$
C 相参考电流 I_C^*	A	$30 \sin(100\pi t + 2\pi/3)$



(a) A 相并网电流波形



(b) B 相并网电流波形



(c) C 相并网电流波形

图 6 ABC 三相并网电流波形

Figure 6 The grid-tied current waveform of ABC three phase

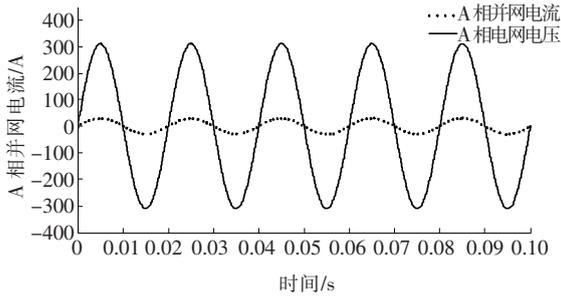


图 7 A 相并网电压电流波形

Figure 7 The grid-tied voltage and current waveform of phase A

表 3 所示分别为 PCI 控制、PR 控制以及模糊 PCI 控制下的并网电流谐波畸变率 (THD), 其值分别为 3.62%、3.35% 及 2.75%。其中 PCI 控制和 PR 控制由于自身控制类型的原因, 可以直接较好地控制交流量, 故两者对应的 THD 值相差不大; 在 PCI 控制基础上加入模糊控制后 THD 值变小, 控制效果有所提高。图 8 所示模糊 PCI 与 PR 并联的新型复合控制对应的 THD 值明显减小, 仅为 2.02%。综合对比 4 种不同控制策略对应的 THD 值, 可知该文所提出的新型复合控制策略对应谐波畸变率最小, 稳态波形质量最优, 能够减少并网逆变器稳态运行时对电网的谐波污染, 达到并网标准。

表 3 仿真 THD 数据

Table 3 The simulated data of THD

控制方法	参数	数值/%
PCI 控制	THD	3.62
PR 控制	THD	3.35
模糊 PCI 控制	THD	2.75

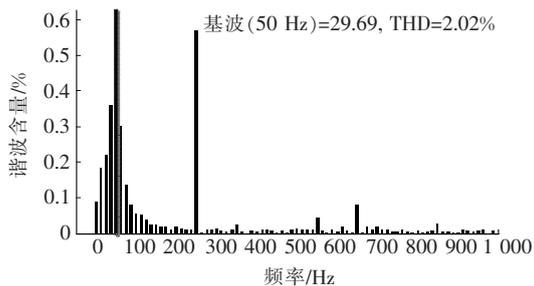


图 8 新型复合控制电流 THD

Figure 8 The THD values under new composite control

的缺点, 首先分析 PCI 和 PR 2 种能够直接控制交流量的控制方法, 着重对适用于传统 ABC 三相坐标系的 PCI 控制器进行改进, 建立模糊规则, 提出模糊 PCI 控制器, 通过模糊控制实时在线调整 PCI 控制器的比例增益和积分增益; 在此基础上进一步研究模糊 PCI 与 PR 并联复合的新型控制策略在控制交流变量时的性能。最后在 Matlab/Simulink 中搭建 PCI 控制、PR 控制、模糊 PCI 控制以及新型复合控制仿真模型, 对并网电流的相关性能进行仿真分析。仿真结果表明, 相比于 PCI 控制以及 PR 控制, 新型复合控制策略对应的稳态电流具有更低的谐波畸变率, 稳态电流波形质量更好; 相比于模糊 PCI 控制, 新型复合控制策略具有更好的跟踪性能, 系统响应速度明显提高。由此证明该文所提出的模糊 PCI 与 PR 并联的新型复合控制策略在直接控制交流变量时的性能更加优越, 可行性更强。

参考文献:

- [1] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.
WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Synthetical control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [2] 王成山, 高菲, 李鹏, 等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 2-9.
WANG Chengshan, GAO Fei, LI Peng, et al. Control strategy research on low voltage microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 2-9.
- [3] 潘旭东, 黄豫, 唐金锐, 等. 新能源发电发展的影响因素分析及前景展望[J]. 智慧电力, 2019, 47(11): 41-47.
PAN Xudong, HUANG Yu, TANG Jinrui, et al. Influencing factors and prospects for development of renewable energy power generation[J]. Smart Power, 2019, 47(11): 41-47.
- [4] 兰佳, 汪东, 陈娅, 等. 双级式光伏发电并网系统控制策略及仿真研究[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 129-136.
LAN Jia, WANG Dong, CHEN Ya, et al. Research on control strategy and simulation of double stage photovoltaic grid connected system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 129-136.
- [5] 李媛媛, 孙自安, 张志刚, 等. 大规模风电机组集中接

6 结语

该文针对传统 PI 控制无法消除交流稳态误差

- 人对系统短路电流的影响[J]. 中国电力, 2018, 51(4): 33-38+88.
- LI Yuanyuan, SUN Zian, ZHANG Zhigang, et al. Impact of wind centralized access on system short circuit current[J]. Electric Power, 2018, 51(4): 33-38+88.
- [6] 杨超颖, 王金浩, 杨赞磊, 等. 不对称故障条件下并网光伏逆变器峰值电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 103-111.
- YANG Chaoying, WANG Jinhao, YANG Yunlei, et al. Control strategy to suppress peak current for grid-connected photovoltaic inverter under unbalanced voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 103-111.
- [7] 武志刚, 程鲁文, 李玮, 等. 智能微网及其可靠并网研究[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(4): 22-27.
- WU Zhigang, CHENG Luwen, LI Wei, et al. Study on smart microgrid and reliable grid-connected microgrid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(4): 22-27.
- [8] 朱炜锋, 窦伟, 徐正国, 等. 基于PI控制的三相光伏并网逆变器电流控制器设计[J]. 可再生能源, 2009, 27(2): 55-58.
- ZHU Weifeng, DOU Wei, XU Zhengguo, et al. Design of the PI current controller of three phase photovoltaic grid-connected inverter[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(2): 55-58.
- [9] 雷亚雄, 李建文, 李永刚. 基于准PR调节器电流双闭环LCL三相并网逆变器控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 44-50.
- LEI Yaxiong, LI Jianwen, LI Yonggang. Control strategy of three-phase LCL grid-connected inverter based on quasi-PR adjuster[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 44-50.
- [10] 冯奕, 颜建虎. 基于比例复数积分的风力发电并网逆变器控制方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 177-182.
- FENG Yi, YAN Jianhu. Wind power grid-connected inverter control method based on proportional complex integral regulator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(13): 177-182.
- [11] 曹鑫晖. 分布式发电并网建模与控制策略研究[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
- [12] 董蕾. 基于比例复数积分控制的单相逆变器并网研究[J]. 电气自动化, 2012, 34(2): 31-34.
- DONG Lei. Research on control strategy of single-phase grid-connected inverter based on proportional complex integral control[J]. Electrical Automation, 2012, 34(2): 31-34.
- [13] 郭小强. 光伏并网逆变器通用比例复数积分控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3393-3399.
- GUO Xiaoqiang. Generalized proportional complex integral control scheme for PV grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3393-3399.
- [14] 张涛, 李家启. 基于参数自整定模糊PID控制器的设计与仿真[J]. 交通信息与安全, 2001, 19(S1): 27-30.
- ZHANG Tao, LI Jiaqi. Design and simulation of fuzzy PID controller based on self-rectifying parameters[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2001, 19(S1): 27-30.
- [15] 陈红生. 基于准比例谐振控制的三相并网光伏逆变器的研制[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [16] 郭小强, 郭伟扬, 赵清林, 等. 三相并网逆变器比例复数积分电流控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(15): 8-14.
- GUO Xiaoqiang, WU Weiyang, ZHAO Qinglin, et al. Current regulation for three-phase grid-connected inverters based on proportional complex integral control[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(15): 8-14.
- [17] 李浩然, 杨旭红, 王亚楠. 基于模糊PR和PI控制的三相逆变器并网研究[J]. 电气传动, 2016, 46(1): 55-59.
- LI Haoran, YANG Xuhong, WANG Yanan. Research on grid-connected three-phase inverter based on fuzzy PR control and PI control[J]. Electric Drive, 2016, 46(1): 55-59.