

提升电能质量的构网逆变器精细抗干扰控制

周中浩, 魏春, 陈强, 尹天琦

(浙江工业大学信息工程学院, 杭州 310023)

摘要: 大规模新能源发电系统的并网导致电力系统并网点出现电压波动和谐波等问题。本文提出了一种构网逆变器精细抗干扰控制策略,可以同时改善电力系统并网点的电压波动和电流谐波问题。首先,设计了一种补偿函数观测器,消除由于非周期性干扰和内部参数不确定性带来的影响,在提升系统动态响应的同时,增强系统的抗扰性和鲁棒性,减小并网点的电压波动;其次,设计了重复控制器,通过将零相位滤波器置于重复控制器内环之外,防止陷波频率的偏移,从而提升谐波抑制能力;最后,在 RT1000 实时仿真器中建立 IEEE 三机九节点系统,验证所提精细抗干扰控制策略的性能。
关键词: 扰动观测器; 重复控制; 电压波动; 谐波抑制; 实时仿真

Elegant Anti-disturbance Control of Grid-forming Inverters for Power Quality Enhancement

ZHOU Zhonghao, WEI Chun, CHEN Qiang, YIN Tianqi

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The integration of large-scale renewable energy generation systems into the power grid has led to such issues as voltage fluctuation and harmonics at the integration point of the power system. In this paper, a elegant anti-disturbance control strategy for grid-forming inverters is proposed for solving the problem of voltage fluctuations and current harmonics in power system. Firstly, a compensating function observer is designed to eliminate the effects due to aperiodic disturbances and internal parameter uncertainties and, at the time of improving the dynamic response of system, enhance the system immunity and robustness as well as reduce voltage fluctuation of the integration point. Then, a repetitive controller is designed to prevent shift of the notch frequency by placing a zero-phase filter outside the inner loop of the repetitive controller, thereby enhancing harmonic suppression capability. Finally, an IEEE three-machine nine-node system is set up in the RT1000 real-time simulator to verify the performance of the proposed elegant anti-disturbance control strategy.

Keywords: disturbance observer; repetitive control; voltage fluctuation; harmonic suppression; real-time simulation

0 引言

近年来,随着传统能源的逐渐枯竭,世界各国面临环境污染和能源危机的双重挑战。面对这些问题,新能源被认可为有效的解决方案。基于电力电子器件的新型电力系统,正在逐步取代以同步发电机为主的传统电力系统^[1]。然而,在大规模新能源发展的背景下,新型电力系统面临新的挑战,其中包括电能质量问题^[2-3]。

新型电力系统因为高比例的新能源和电力电

子设备,往往表现出低惯量、抗扰能力不足以及能源供给不确定等特点^[4-5]。基于电力电子的新能源设备多分布于电网条件不理想的地区,大量非线性负荷会导致电流谐波等电能质量问题,引发电网中的谐振现象,导致局部电压和电流的急剧升高,从而降低电能利用效率^[6-7]。此外,新型电力系统的负荷特性与传统负荷差异较大,负荷的投切导致并网点处电压波动增加,会影响电力设备的正常运行,特别是对电压敏感的负荷,同时加大了电网的功率损耗,尤其是在负荷频繁投切的情况下,电压波动

收稿日期:2025-02-15

基金项目:国家自然科学基金(62222315)。

会加大线路和变压器的损耗,降低电网的运行效率^[8]。

为维持电网侧电压的稳定,可以利用直流电压的下垂控制方法解决逆变器功率分配不平衡问题,然而这类控制策略对于负载快速变化的响应较慢,可能导致系统不稳定^[9-10];文献[11]提出了自适应下垂控制,通过虚拟电容替代惯性响应以缓解负载变化引起的电压变化率,但在面对较大电压波动时效果有限。比例谐振控制器可以抑制较大的电压波动,但其比例增益和重置增益相互影响,因此控制器参数的调节较为困难^[12];文献[13]提出了未知系统动态估计器,可以利用低通滤波器有效的估计出电压波动的干扰,只需调整一个滤波器参数,易于实现。自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)可以实现对干扰的抑制并提高系统的精确性,在复杂的电力系统中具有良好的应用前景^[14]。

目前,电力系统中存在多种谐波抑制方法,其中,传统的无源滤波器或有源滤波器的体积较大且谐波抑制能力有限^[15]。为改善弱电网中存在的谐波问题,文献[16]提出了一种基于下垂控制的谐波抑制策略,通过傅立叶分析得到的谐波分量作为逆变器控制的参考值,但改善效果仍然有限;文献[17]将谐波电导-谐波电流下垂控制策略应用在 LCL 滤波电路中来改善谐波问题,然而逆变器输出电容的电压过度调节会导致并网电压失真。此外,谐振控制可以嵌入控制系统中补偿干扰^[18],但基于比例积分的谐振控制器只能减少谐振频率附近的电流谐波^[19]。基于内模控制的重复控制器类似于多个谐振控制器并联连接,可以减少不同频率的电流谐波^[20]。由于传统重复控制具有动态性能差的特征,文献[21]提出一种频率自适应前馈双模重复控制来提升其动态性能。

本文提出了一种精细抗干扰控制(elegant anti-disturbance control, EAD)方法,旨在兼顾动态性能和抗扰能力,同时有效抑制并网点的电压波动,并改善网侧电流谐波问题。设计了一种带补偿函数的扩张状态观测器(extended state observer, ESO),消除由于非周期性干扰和内部参数不确定性带来的影响,增强系统的抗扰性和鲁棒性。同时,针对并网点的谐波问题,设计基于内模原理的重复控制器,通过将零相位低通滤波器移至内环外部,减少了相位延迟,从而提高了谐波抑制的能力。最后,在 RT1000 实时仿真平台上建立 IEEE 三机九节点系统模型^[22],验证所提精细抗干扰控制策略的有效性。实验结果表明,该策略具有良好的抗干扰能力和谐波抑制能力,有助于提升系统的电能质量。

1 基础模型

1.1 虚拟同步发电机并网模型

基于精细抗干扰的 VSG 并网拓扑见图 1。该系统主要由三相逆变器、LC 滤波器和控制结构 3 部分组成。控制结构包括有功频率控制环、无功电压控制环、电压环和基于精细抗干扰的电流环。

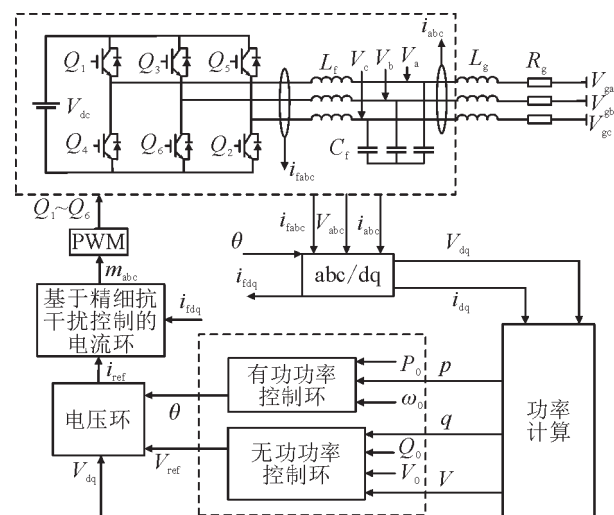


图1 基于精细抗干扰的VSG并网拓扑
Fig. 1 VSG grid integrated topology based on elegant anti-disturbance control

图1中: V_{dc} 为直流侧电压; L_f 和 C_f 分别为逆变器侧滤波电感和电容; V_{abc} 和 i_{abc} 分别代表逆变器输出的电压和电流; V_{gabc} 和 i_{gabc} 分别表示电网侧的电压和逆变器侧电流; L_g 和 R_g 是逆变器到电网之间的等效线路阻抗; P_0 和 P 分别为逆变器的有功功率指令值和实际输出的有功功率; Q_0 和 Q 分别为无功功率的指令值和实际输出的无功功率; θ 和 V_{ref} 是虚拟同步发电机生成的虚拟相位角和虚拟电动势^[23-24]。

1.2 基于ADRC的逆变器模型

以下是基于 ADRC 的电流环 q 轴设计

$$\frac{di_q}{dt} = b_0(V_q - V_{gq}) - \omega_i i_d = f_{iq} + b_0(V_q - V_{gq}) \quad (1)$$

式中: f_{iq} 为 q 轴的总扰动量; $b_0 = 1/L_f$ 为可调系数, 记 $x_1 = i_q$, $x_2 = f_{iq}$, $u = V_q - V_{gq}$, 上述方程的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + b_0 u \\ \dot{x}_2 = \dot{f}_{iq} \end{cases} \quad (2)$$

将上式用矩阵表示为

$$\dot{x} = Ax + Bu + Eh \quad (3)$$

式中 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 、 $B = \begin{bmatrix} b_0 \\ 0 \end{bmatrix}$ 、 $E = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 、 $h = \dot{f}_{iq}$ 表示扰动量的导数。根据式(3)设计线性状态观测器的方程为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \dot{i}_q = z_2 + \beta_1(x_1 - z_1) + b_0 u \\ \dot{z}_2 = \dot{f}_{iq} = \beta_2(x_1 - z_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\hat{f}_{iq}$ 为 f_{iq} 的观测值; $\hat{i}_q$ 为 i_q 的观测值; $\beta_1 = 2\omega_{\text{eso}}$, $\beta_2 = \omega_{\text{eso}}^2$, ω_{eso} 为 ESO 的带宽。根据状态反馈控制律,将控制信号设计为

$$u = \frac{k_{\text{p-ADRC}}(\hat{i}_q - \hat{i}_q) - \hat{f}_{iq}}{b_0} \quad (5)$$

式中, $k_{\text{p-ADRC}}$ 是比例增益。

逆变器电流环的设计见图 2。

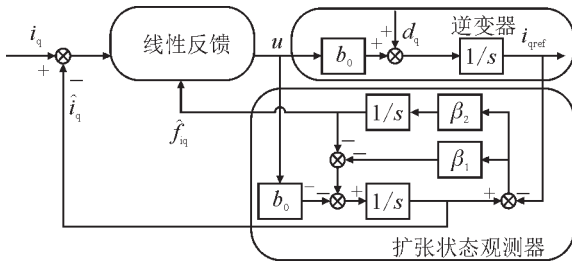


图2 基于ADRC的 q 轴电流控制器框图

Fig. 2 Block diagram of q -axis current controller based on ADRC

1.3 基于重复控制的逆变器模型

以 q 轴为例,设计电流重复控制器如下

$$G_{\text{RC}} = k_r \frac{Q(z)z^{-N}}{1 - Q(z)z^{-N}} F(z) \quad (6)$$

式中, k_r 为重复控制器增益。 k_r 取不同值时,重复控制的开环伯德图见图 3,当 k_r 值提高时,在各个频率处的谐振增加,同时误差收敛加快; $F(z)$ 为被控对象补偿器; $Q(z)$ 为一阶低通滤波器; f_r 是电流的基频为 50 Hz; f_s 是采样频率; N 为 f_s/f_r , 是每个周期的采样点数。通过延迟环节 z^{-N} 将信号延迟一个完整的基波周期,增强基波成分,并对特定次数的谐波实现相位相反叠加,从而达到降低谐波含量的目标。根据该算法,逆变器电流环的设计见图 4。

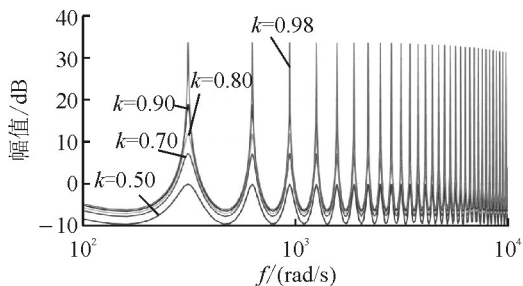


图3 k_r 取不同值时重复控制的开环伯德图

Fig. 3 The open-loop Bode plot of repetitive control when k_r takes different values

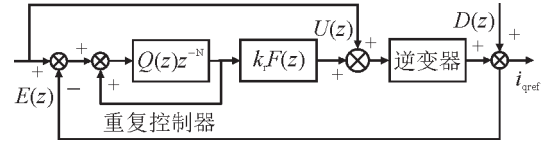


图4 基于重复控制的 q 轴电流控制器的框图

Fig. 4 Block diagram of q -axis current controller based on RC

2 所提精细抗干扰控制

2.1 基于补偿函数的线性自抗扰控制

由于 ADRC 的抗干扰能力存在一定局限,本文设计了一种基于补偿函数的线性自抗扰控制策略,以提高并网逆变器的抗干扰能力,同时兼顾动态性能和鲁棒性^[25]。

根据式(1)系统方程可改写为

$$\begin{cases} u = v_q - v_{\text{gq}} \\ \dot{i}_q = b_0 u + d = \frac{1}{L_f}(v_q - v_{\text{gq}}) + d \end{cases} \quad (7)$$

传统的 ESO 是非导数形式,当 $\int i_q dt$ 具有一定观测误差时,会进一步影响电流 i_q 和总扰动 d 的观测精度,为解决这问题,设计了一种纯积分型观测器。

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = b_0 u + h_1(\int i_q dt - z_1) + h_2(i_q - z_2) \end{cases} \quad (8)$$

式中: z_1 是 $\int i_q dt$ 的估计值; z_2 是 i_q 的估计值; h_1 和 h_2 为观测器增益。可由式(7)和(8)得

$$\hat{d} = h_1(\int i_q dt - z_1) + h_2(i_q - z_2) = \dot{z}_2 - b_0 u \quad (9)$$

式中: $\hat{d}$ 为 d 的估计值,观测误差可以由式(7)减去式(8)获得

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = d - h_1 e_1 - h_2 e_2 \end{cases} \quad (10)$$

根据式(10)可以看出 e_1 和 e_2 之间存在微分关系,消除累积误差。为了减少干扰对估计误差的影响,提高系统的抗扰能力,在观测器中引入了补偿函数为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = h_1(\int i_q dt - z_1) + h_2(i_q - z_2) + b_0 u + \tilde{d} \\ \hat{d} = h_1(\int i_q dt - z_1) + h_2(i_q - z_2) + \tilde{d} \end{cases} \quad (11)$$

将式(8)减去式(11),可得补偿后观测器误差为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = -(h_1 e_1 + h_2 e_2) + (d - \tilde{d}) \end{cases} \quad (12)$$

当 $\tilde{d}$ 充分接近 d 时,观测器的估计误差将减小,介于 $\tilde{d}$ 和 $\hat{d}$ 的目标都是 d ,可使用滤波器将他们联系起来。设 $\lambda = 2\pi f_c$ 为滤波因子, f_c 为滤波器的截止频率,可得带补偿函数的观测器表达式为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = h_1 e_1 + h_2 e_2 + b_0 u + \tilde{d} \\ \dot{\hat{d}} = h_1 e_1 + h_2 e_2 + \tilde{d} \\ \tilde{d} = \frac{\lambda}{s + \lambda} \hat{d} \end{cases} \quad (13)$$

从式(13)可得基于补偿函数线性自抗扰控制的特征方程为

$$s^3 + h_1 s^2 + \lambda h_1 s + h_2 s + \lambda h_2 = 0 \quad (14)$$

当式(14)的所有根都位于左半平面内时,系统是稳定的。根据状态反馈控制律,误差反馈控制率 u 可以设计为

$$u = \frac{K_{p-EDA}(r - z_2) - \hat{d}}{b_0} \quad (15)$$

式中: r 是电流的参考信号; K_{p-EDA} 是比例增益;根据该算法,逆变器电流环的设计见图 5。

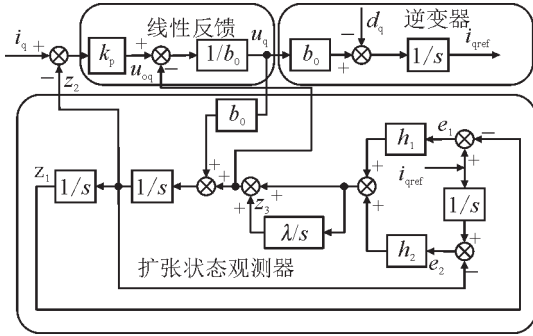


图5 基于CFO-LADRC的 q 轴电流控制器的框图
Fig. 5 Block diagram of q -axis current controller based on CFO-LADRC

结合式(14)和式(15)可以得到

$$\begin{cases} u = \frac{1}{b_0} G_1(s) [k_p r - H(s)y] \\ H(s) = \frac{h_2 s^3 + \alpha s^2 + \beta s + k_p \lambda h_1}{s^3 + h_2 s^2 + (h_1 + \lambda h_2)s + \lambda h_1} \\ G_1(s) = \frac{s^3 + h_2 s^2 + (h_1 + \lambda h_2)s + \lambda h_1}{s^3 + k_p s^2} \end{cases} \quad (16)$$

式中,参数 α 和 β 表示为

$$\begin{cases} \alpha = h_1 + \lambda h_2 + k_p h_2 \\ \beta = \lambda h_1 + \lambda k_p h_2 + k_p h_1 \end{cases} \quad (17)$$

根据(16)可以推出系统的输出和干扰之间的传递函数为

$$G_{CFO-ADRC}(s) = \frac{s^2}{s^3 + h_2 s^2 + (h_1 + \lambda h_2)s + \lambda h_1} \quad (18)$$

根据式(18)可得

$$s^3 + h_2 s^2 + (\lambda h_2 + h_1)s + \lambda h_1 = (s + 3\omega_c)(s + 12\omega_c)^2 \quad (19)$$

依据极点配置法,特征方程的根分别为 $-3\omega_c$, $-12\omega_c$, $-12\omega_c$, 只要满足 $\omega_c > 0$ 的条件,特征方程所有的根都位于复平面的左半平面内。其中,

$h_1 = 108\omega_c^2$, $h_2 = 27\omega_c$, $\lambda = 4\omega_c$, ω_c 和 k_p 是需要调整的参数。

2.2 零相位重复控制

传统低通滤波器会导致一定的相位延迟,使电流的峰值不能与谐振频率重合,从而削弱控制器的谐波抑制能力。本文设计零相位低通滤波器,并将其移动到内环之外以提高陷波频率的峰值,消除重复控制器的相位延迟。

设计的电流环零相位重复控制器的传递函数可表示为

$$G_{ZRC}(z) = k_r \frac{Q(z)z^{-N}}{1 - z^{-N}} F(z) \quad (20)$$

零相位低通滤波器的表达式为

$$Q(z) = az + b + az^{-1} \quad (21)$$

式中, a 和 b 需要满足

$$2a \leq b \quad (22)$$

为了选取最佳的 $Q(z)$ 参数,使用不同的参数来研究 $Q(z)$ 的幅频特性,如图 6 中的 $Q_A(z)$ 、 $Q_B(z)$ 和 $Q_C(z)$ 所示。

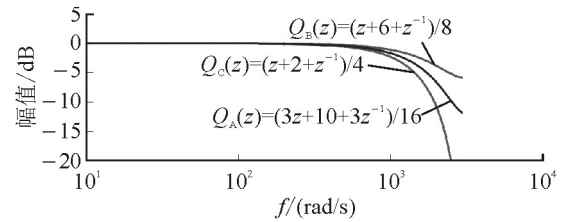


图6 不同参数组时 $Q(z)$ 的幅频特性
Fig. 6 Amplitude-frequency characteristics of $Q(z)$ under different parameter sets

与另外两组参数相比, $Q_C(z)$ 的增益在低频区更接近于 0 dB,且幅频特性曲线在截止频率之外有较大的梯度。因此, $Q_C(z)$ 确保了更好的稳态性能,并且使系统更容易保持稳定。此外,还可以发现 $Q_A(z)$ 、 $Q_B(z)$ 和 $Q_C(z)$ 均保持了零相位延迟,不会对系统造成相位延迟。因此,我们选择 $a = 1/4$, $b = 1/2$ 来获得重复控制器的最优性能。

基于零相位重复控制的 q 轴电流控制器框图见图 7。

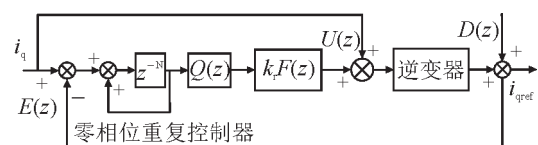


图7 基于零相位重复控制的 q 轴电流控制器框图
Fig. 7 Block diagram of q -axis current controller based on ZRC

2.3 精细抗干扰控制的电流环控制器设计

结合基于补偿函数的线性自抗扰控制和零相位重复控制,本文设计精细抗干扰控制器,同时实现抗扰性能和谐波抑制能力。以 q 轴电流为例,精细抗干扰控制框图见图8。图8中,扰动到输出的传递函数为

$$\begin{cases} G(z) = G_0(z) \frac{1 - z^{-N}}{1 - z^{-N}(1 - k_r Q(z) G_0(z) F(z))} \\ G_0(z) = \frac{P(z)}{1 + G_{\text{CFO-ADRC}} P(z)} \\ G_{\text{CFO-ADRC}} = \frac{s^2}{s^3 + h_2 s^2 + h_1 s + \lambda h_2 s + \lambda h_1} \end{cases} \quad (23)$$

式中, $P(z)$ 为逆变器的传递函数。

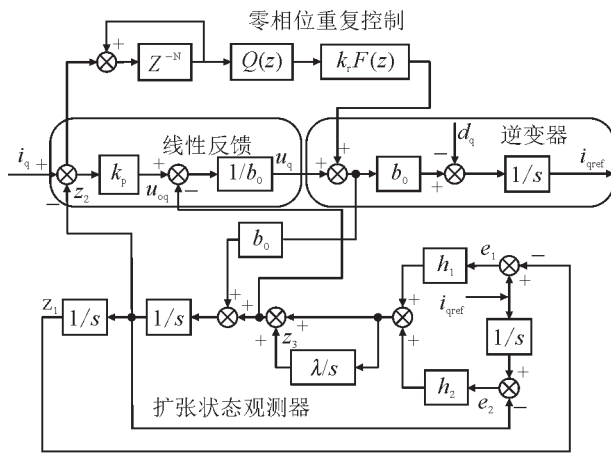


图8 基于精细抗干扰的 q 轴电流控制器的框图

Fig. 8 Block diagram of q -axis current controller based on elegant anti-disturbance

2.4 精细抗干扰控制稳定性证明

根据图8,精细抗干扰控制系统的跟踪误差可表示为

$$E(z) = \frac{i_q(z) - D(z)}{1 + (G_{\text{ZRC}} + G_{\text{CFO-ADRC}}) \times P(z)} \quad (24)$$

由此,系统的特征方程为

$$\begin{aligned} 1 + (G_{\text{ZRC}} + G_{\text{CFO-ADRC}}) \times P(z) &= \\ A \times \left[1 + \frac{G_{\text{ZRC}} \times P(z)}{1 + G_{\text{CFO-ADRC}} \times P(z)} \right] &= \\ A \times [1 + G_{\text{ZRC}} \times G_0(z)] & \end{aligned} \quad (25)$$

式中, $A = 1 + G_{\text{CFO-ADRC}} \times P(z)$ 。

因此,基于精细抗干扰的控制系统若要稳定,需要满足以下两个条件:

- 1) $1 + G_{\text{ADRC}} \times P(z) = 0$ 的根在单位圆内;
- 2) $|1 + G_{\text{ZRC}}(z) \times G_0(z)| \neq 0$ 。

本部分条件1可以通过选择合适的 ω_c 和 k_p 来满足^[26]。条件2可以通过选择合适的低通滤波器

$Q(z)$ 和相位补偿器 $k_r F(z)$ 满足^[20]。

如果满足以下条件:

$$\lim_{\omega \rightarrow \omega_n} |G(j\omega)| = 0 \quad (26)$$

式中: $\omega_n = \omega_0, 2\omega_0, \dots, n\omega_0$, 则可证明 $D(z)$ 中的谐波对系统输出没有影响。

3 实时仿真分析

本文采用实时数字仿真系统 RT1000, 该系统能够仿真电力系统元件和控制模块, 设备间通信采用工业级高速协议, 能够实现电力系统的实时仿真。

为了验证改进算法在低惯性电力系统中抑制电压波动和谐波的能力, 本文使用改进的三机九节点系统, 该系统由一台额定功率为 100 MVA 的同步发电机和两个额定容量为 100 MVA 构网逆变器组成, 如图9所示。系统中有 9 个母线节点, 代表新型电力系统中的负荷节点, 这些节点可以用于模拟电网中的负荷变化情况。在突加负载干扰的情况下测试控制算法对并网点电压波动和电流谐波的改善效果。虚拟同步发电机控制参数见表1。

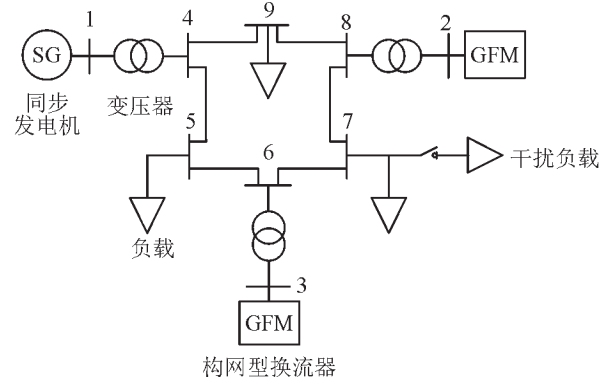


图9 IEEE九节点测试系统

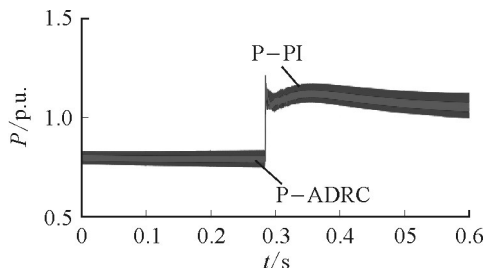
Fig. 9 The IEEE nine-node test system

表1 虚拟同步发电机控制参数
Table 1 Control parameters of the VSG

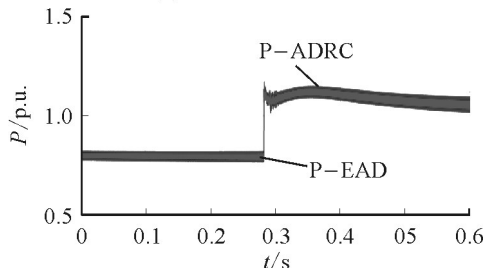
参数	数值
ADRC控制器参数 β_1	6 000
ADRC控制器参数 β_2	9×10^6
ADRC控制器参数 K_{p-ADRC}	10 000
EAD控制器参数 K_{p-EAD}	16 000
EAD控制器参数 h_1	6 300
EAD控制器参数 h_2	5.88×10^6

3.1 电压波动抑制效果分析

当系统在接近其额定容量运行时突加负载干扰, 分析提出的 EAD 算法在抑制由突加负载引起的电压波动的效果。图10和图11展示了在突加负载干扰下, PI, ADRC 以及 EAD 算法对输出功率跟踪的性能和并网点电压波动抑制的性能对比。



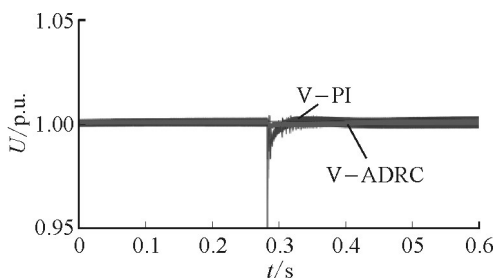
(a) PI 和 ADRC 效果对比



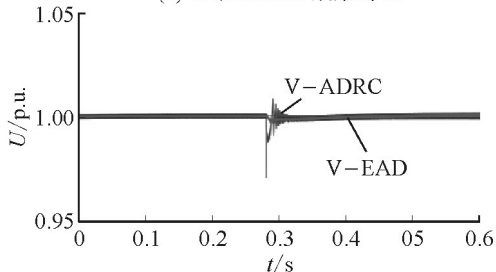
(b) EAD 和 ADRC 效果对比

图 10 突加负载下功率跟踪效果对比

Fig. 10 Comparison of power tracking effects under sudden loading



(a) PI 和 ADRC 效果对比



(b) EAD 和 ADRC 效果对比

图 11 突加负载下抑制电压波动效果对比

Fig. 11 Comparison of voltage fluctuation suppression effects under sudden loading

系统在 $t = 0.3 \text{ s}$ 时接入了 75 MW 的负载。从图 10(a)可以看出,相较于 PI 算法,ADRC 算法的跟踪性能和精确度都有提升。同时,由图 10(b)可以看出所提出的 EAD 算法比 ADRC 算法具有更小的抖振。

从图 11(a)中的并网点电压可以看出,当使用 PI 算法时电压波动约为 5.5% ,并在 0.1 s 后消失,电压趋于稳定,然而这种电压波动会影响电能质量,不利于系统的稳定运行。使用 ADRC 算法后电压波动明显改善,约为 2.8% ,且在 0.04 s 后电压趋于稳定。从图 11(b)可见,EAD 算法进一步改善了电压波动问题,波动幅度降至约 0.4% ,并在 0.02 s

后电压趋于稳定。

结果表明,EAD 算法能够显著改善负荷变化时的电能质量,减少电压波动并提升输出功率的跟踪性能,验证了该方法的有效性。

3.2 谐波抑制效果分析

为了验证 EAD 算法对并网点电流谐波的抑制能力,在仿真系统中注入 5 次、7 次、11 次和 13 次谐波,并分别应用重复控制和 EAD 算法进行谐波整治,仿真结果见图 12。应用 PI 算法时,电流畸变严重,电流的总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)高达 13.43% 。在引入重复控制进行谐波抑制后,电流的 THD 显著改善,减少到 6.85% ,如图 12(a)所示。尽管谐波含量减少了 49.0% ,但仍未达到规定的并网要求。使用提出的 EAD 算法进行谐波抑制时,从图 12(b)可以看出,电流的 THD 从 6.85% 进一步降低到 1.86% 。结果表明与其他两种控制策略相比,EAD 算法具有更好的谐波抑制能力,表 2 展示了使用这两种不同控制策略时的电流谐波含量,EAD 控制下的第 5、7、11、13 次电流谐波含量分别为 1.36% 、 0.97% 、 0.62% 、 0.52% ,含量低于使用重复控制器时的谐波电流,证明了 EAD 控制具有良好的谐波抑制特性。

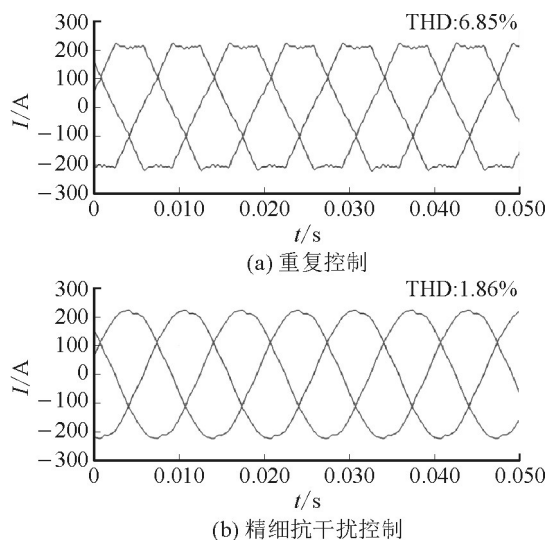


图 12 并网点电流谐波抑制效果

Fig. 12 Current harmonic suppression effect at PCC point

表 2 并网点电流谐波含量

Table 2 Harmonic content of current of PCC point		
谐波	重复控制/%	精细抗干扰/%
5 th	5.02	1.36
7 th	3.44	0.97
11 th	2.28	0.62
13 th	1.92	0.52
THD	6.85	1.86

3.3 参数失配情况下的效果分析

为了评估所提算法的鲁棒性,当电感降低到原值的一半时,对系统进行分析,电感参数失配下功率跟踪效果对比见图 13,抑制电压波动效果对比见图 14。从图 13(a)可看出,PI 算法的鲁棒性较差,结合图 13(b)可以看出,EAD 算法表现出了最佳的跟踪性能和鲁棒性能。图 14(a)中可以看出,ADRC 算法具有较好的鲁棒性,但是在参数失配下对系统电压波动抑制是有限的。在图 14(b)中可以看出应用 EAD 算法电压波动仅为 0.5%,比没有参数失配时增加了 0.1%。

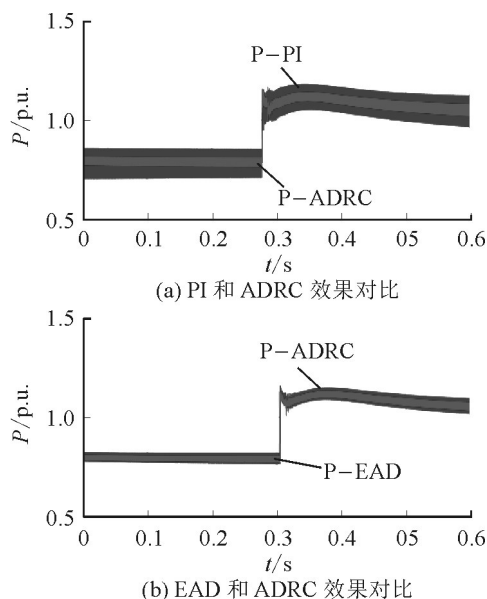


图 13 电感参数失配下功率跟踪效果对比
Fig. 13 Comparison of power tracking effects under mismatch of inductor parameter

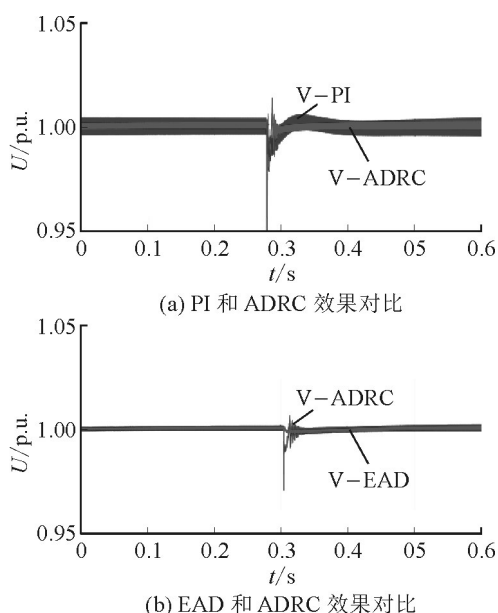


图 14 电感参数失配下抑制电压波动效果对比
Fig. 14 Comparison of voltage fluctuation suppression effects under mismatch of inductor parameter

结果表明与其他两种控制策略相比,所提出的算法具有更好的鲁棒性。

在逆变器电感参数失配时,电流的总谐波畸变率 THD 从 13.43% 增加到 16.38%,电能质量将进一步恶化。引入重复控制进行谐波抑制后,电流的 THD 减少到 7.68%,如图 15(a)所示。然而,EAD 算法具有很好的鲁棒性,从图 15(b)中可以看出,电流的 THD 降低到 2.53%,远低于规定的并网标准 5%。该策略有效地整治了网侧谐波,提高了并网点电能质量。

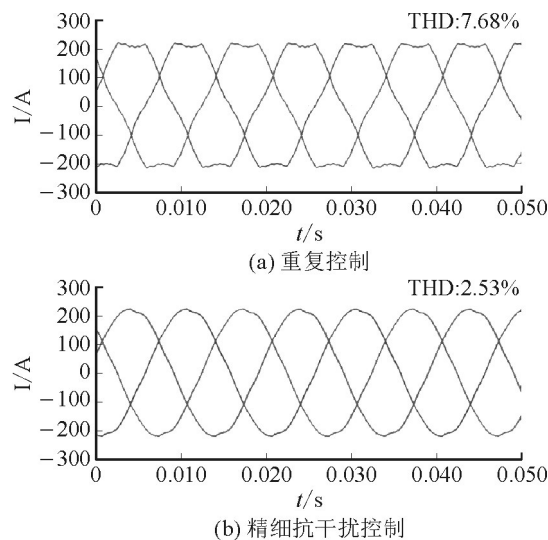


图 15 电感参数失配下并网点电流谐波抑制效果
Fig. 15 Current harmonic suppression effect at PCC point under mismatch of inductor parameter

4 结语

本文提出了一种精细抗干扰控制策略,旨在降低电流谐波,同时改善并网点的电压波动问题。通过引入补偿函数,提升了系统的抗干扰性能。使用零相位低通滤波器代替传统的一阶滤波器,使控制系统具备更优的性能。基于所提出的精细抗干扰控制方法,本文对电流环的参数设计、稳定性、抗干扰性、跟踪能力和鲁棒性进行了分析,并通过 RT1000 实时仿真系统进行了验证。与传统方法相比,所提出的精细抗干扰控制方法能够显著抑制电流谐波和电压波动,具有良好的动态响应特性和较强的鲁棒性。

参考文献

- [1] HOLTINEN H, KIVILUOMA J, FLYNN D, et al. System impact studies for near 100% renewable energy systems dominated by inverter based variable generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 3249-3258.
- [2] 晏坤,甘景福,杜鹏,等. 光伏并网逆变器系统谐波综合分

- 析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(5): 98-107.
- YAN Kun, GAN Jingfu, DU Peng, et al. Comprehensive analysis of harmonics of photovoltaic grid-connected inverter system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(5): 98-107.
- [3] LASSETER R H, CHEN Zhe, PATTABIRAMAN D. Grid-forming inverters: a critical asset for the power grid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 925-935.
- [4] JAIN H, MATHER B, JAIN A K, et al. Grid-supportive loads - a new approach to increasing renewable energy in power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2959-2972.
- [5] ZHANG Haobo, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1239-1256.
- [6] FAIFER M, LAURANO C, OTTOBONI R, et al. Harmonic distortion compensation in voltage transformers for improved power quality measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(10): 3823-3830.
- [7] ZHOU Leming, SHUAI Zhikang, CHEN Yandong, et al. Impedance-based harmonic current suppression method for VSG connected to distorted grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(7): 5490-5502.
- [8] RITUVIC PANDEY, NISHANT KUMAR. Enhanced power quality control in microgrid-assisted electric vehicle charging systems using ATOGI and CIDPC[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025, 61(1): 676-685.
- [9] MI Yang, HAN Zhang, FU Yang, et al. Intelligent power sharing of DC isolated microgrid based on fuzzy sliding mode droop control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2396-2406.
- [10] TT TEO, T LOGENTHIRAN, WL WOO, et al. Advanced control strategy for an energy storage system in a grid connected microgrid with renewable energy generation[J]. IET Smart Grid, 2018, 1(3): 96-103.
- [11] WANG Yi, WANG Chen, XU Lie, et al. Adjustable inertial response from the converter with adaptive droop control in DC grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3198-3209.
- [12] LIANG Weihua, LIU Yitao, SHEN Yongpeng. Active power control integrated with reactive power compensation of battery energy stored quasi-Z source inverter pv power system operating in VSG mode[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(1): 339-350.
- [13] CHEN Qiang, WANG Manyi, WEI Chun, et al. Unknown system dynamic estimator-based two-phase power reaching law control for DC-DC buck converter[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2023, 70(11): 4641-4649.
- [14] 史丽萍, 金荣泽, 王明金, 等. 一种新型 APF 直流侧电压控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(3): 20-25.
- SHI Liping, JIN Rongze, WANG Mingjin, et al. Novel DC-side voltage control strategy for APF[J]. Power capacitor & reactive power compensation, 2020, 41(3): 20-25.
- [15] MOHAMMAD M HASHEMPOUR, MEHDI SAVAGHEBI, JUAN C VASPUEZ, et al. A control architecture to coordinate distributed generators and active power filters coexisting in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5): 2325-2336.
- [16] QING CHANG Zhong. Harmonic droop controller to reduce the voltage harmonics of inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(3): 936-945.
- [17] AMEEN HASSAN YAZDAVAR, MAHER AZZOUZ, EHAB F EL-SAADANY. A novel decentralized control scheme for enhanced nonlinear load sharing and power quality in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 29-39.
- [18] HE Jinwei, LI Yunwei, MD SHIRAJUM MUNIR. A flexible harmonic control approach through voltage-controlled DG-grid interfacing converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 444-455.
- [19] SONG Zhanfeng, ZHANG Zhen, HASAN KOMURCUGIL, et al. Controller-based periodic disturbance mitigation techniques for three-phase two-level voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(10): 6553-6568.
- [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 repetitive-proportional compound controller for harmonic suppression in grid-connected inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24): 5189-5198.
- [21] 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-proportional control for grid-connected inverter in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4843-4855.

- 分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(2): 9-12.
- WANG Heping, WANG Gang, SONG Hua, et al. Calculation and analysis of engineering parameters for the shunt capacitor compensation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(2): 9-12.
- [18] 梁琮. 并联电容器组不平衡保护初始值的估算[J]. 电力电容器, 2002(3): 1-4.
- LIANG Cong. Estimating the initial value of the unbalance protection for shunt capacitor bank[J]. Power Capacitor, 2002(3): 1-4.
- [19] 周宗金. 谈电力电容器无功补偿及其安全应用[J]. 科技与企业, 2013(22): 367-367.
- [20] 武家辉, 王维庆, 王海云, 等. 哈郑特高压直流送端电网静态电压薄弱点研究与无功补偿[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(3): 134-139.
- WU Jiahui, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Study on the weak point of static voltage of transmission end in hazheng UHVDC transmission system and reactive power compensation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(3): 134-139.
- [21] 潘志文, 崔桂梅. 电力电容器的电容值测量及失效分析[J]. 物理测试, 2011(6): 59-62.
- PAN Zhiwen, CUI Guimei. Measurement of capacitor value and failure analysis of power capacitors[J]. Physics Examination and Testing, 2011(6): 59-62.
- [22] 刘天祥, 姚孟, 吕拦坡. 高压电力电容器不平衡故障处理方法及其优化[J]. 中文科技期刊数据库(全文版), 2017(1): 177-178.
- LIU Tianxiang, YAO Meng, LYU Lanpo. Processing method and optimization of high voltage power capacitor unbalance fault[J]. Chinese Science and Technology Journal Database (Full Text) Engineering Technology, 2017(1): 177-178.
- [23] 余江, 周红阳, 赵曼勇. 高压电容器不平衡保护的相关问题[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 85-89.
- YU Jiang, ZHOU Hongyang, ZHAO Manyong. Related problems of unbalance protection for high voltage capacitor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 85-89.
- [24] 雷鸣东, 张世洪, 许可, 等. 基于相对电流检测的桥差不平衡保护电容器组故障定位方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(1): 1-5.
- LEI Mingdong, ZHANG Shihong, XU Ke, et al. Study on fault location method of bridge differential unbalanced protection capacitor bank based on relative current detection[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1): 1-5.

作者简介:

江金成(1989—), 男, 工程师, 主要从事特高压直流控制与保护技术工作。E-mail: 1195573731@qq.com。

彭寅章(1992—), 男, 工程师, 主要从事特高压直流控制与保护技术工作。

王尚德(1992—), 男, 工程师, 主要从事特高压换流站二次设备检修工作。

王鸿(1987—), 男, 工程师, 主要从事特高压直流控制与保护技术工作。

赵海鹏(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事特高压直流控制与保护技术工作。

(上接第89页)

- [22] ALI TAYYEBI, DOMINIC GROSS, ADOLFO ANTA, et al. Frequency stability of synchronous machines and grid-forming power converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 9133-9144.
- [23] CHEN Meng, ZHOU Dao, FREDE BLAABJERG. Enhanced transient angle stability control of grid-forming converter based on virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 9133-9144.
- [24] YU Yunjun, HU Xiang. Active disturbance rejection control strategy for grid-connected photovoltaic inverter based on virtual synchronous generator[J]. IEEE Access, 2019(7): 17328-17336.
- [25] QI Guoyuan, XIA Li, CHEN Zengqiang. Problems of extended state observer and proposal of compensation function observer for unknown model and application in UAV[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(5): 2899-2910.
- [26] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]// Proceedings of 2003 American Control Conference. St Louis, USA: IEEE Press, 2003: 4989-4996.

作者简介:

周中浩(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为重复控制和主动干扰抑制控制。

魏春(1987—), 男, 副教授, 研究方向为新能源发电控制技术。E-mail: chunwei18@zjut.edu.cn。

陈强(1984—), 男, 教授, 研究方向为机电伺服系统自适应与学习控制。

尹天琦(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步风力发电系统抗干扰控制。