

不平衡电网电压下基于无模型自适应控制的WECS控制研究

赵晨聪¹, 谢宙桦², 周飞航³

- (1. 西安文理学院 信息工程学院, 陕西 西安 710065;
2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;
3. 西安邮电大学 自动化学院, 陕西 西安 710121)

摘要:不平衡电网电压会影响风能转换系统(WECS)的正常并网运行,导致系统输出功率的波动以及输出电流的畸变。此外,在实际的永磁同步风电系统中可能会由于环境温度的变化以及检测误差等原因使得网侧电路参数存在不确定性的问题,如果参数发生改变,传统控制方法的性能将会下降。基于此,提出了一种基于灰色预测的无模型自适应控制(MFAC)方案,以缓解因电路参数不确定性导致的性能下降问题,使控制系统具有更好的抗干扰能力。此外,采用三种独立的控制方法来解决不平衡电网电压下并网输出功率的波动及电流畸变问题。仿真对比结果表明,所提控制策略不仅在电路标称参数下具有良好的静态和动态性能,而且当网侧电感参数变化时,系统的鲁棒性也得到提高,验证了所提方案的优越性。

关键词:不平衡电网电压;WECS控制策略;灰色预测;MFAC方案;参数不确定性

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25123

Research on WECS Control Based on Model-free Adaptive Control Under Unbalanced Grid Voltage

ZHAO Chencong¹, XIE Zhouhua², ZHOU Feihang³

- (1. School of Information Engineering, Xi'an University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. School of Automation, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, Shaanxi, China)

Abstract: Unbalanced grid voltage will affect the normal grid connection operation of the wind energy conversion system (WECS), resulting in fluctuations in system output power and distortion of output current. In addition, in the actual permanent magnet synchronous wind power system, there may be uncertainties in the network side circuit parameters due to changes in ambient temperature and detection errors. If the parameter changes, the performance of traditional control methods will decline. Based on this, a model-free adaptive control (MFAC) scheme based on grey prediction was proposed to alleviate the performance degradation problem caused by parameter uncertainty and make the control system have better anti-interference ability. Furthermore, three independent control methods were adopted to solve the problem of grid connected output power fluctuation and current distortion under unbalanced grid voltage. The simulation results show that the proposed control strategy not only has good static and dynamic performance under nominal parameters, but also improves the robustness of the system when the grid side inductance changes, which verifies the superiority of the proposed scheme.

Key words: unbalanced grid voltage; wind energy conversion system (WECS) control strategy; grey prediction; model-free adaptive control (MFAC) scheme; parameter uncertainties

近年来,我国正着力推动能源结构的调整与改造提升,能源结构正从以煤炭为主向多元化过渡,能源消费结构也更加低碳化。在2021年9

月,我国提出要力争于2030年前达到碳峰值,努力争取于2060年前实现碳中和。风力发电具有清洁、低碳、环保等多方面优点,并且在国家政策

基金项目:陕西省教育厅科学研究计划项目(23JK0632);陕西省自然科学基金项目(2023-JC-QN-0515)

作者简介:赵晨聪(1991—),女,博士,讲师,主要研究方向为新能源发电并网控制,Email:zccbstqk@163.com

的大力推动下,我国风能利用水平不断提升。由于风力发电具有间歇性和波动性,若将大规模风电接入电网,则电网的可靠运行会受到冲击^[1-2],并且实际的电网易受到不平衡负载及故障等因素的影响,进而出现电压不平衡的现象。此外,考虑到在实际的永磁同步风电系统中可能会由于环境温度的变化以及检测误差等原因使得风电系统电路参数存在不确定性的问题,进而影响系统的运行性能。因此,研究不平衡电网电压下具有参数不确定性的风能转换系统(wind energy conversion system, WECS)控制策略具有重要意义。

当电网电压出现不平衡情况时,永磁同步风电系统的并网功率会出现波动,输出电流会出现谐波畸变等问题。针对输出功率的波动以及电流的畸变,主要有三种控制方式:1)平衡正序控制(balanced positive sequence control, BPSC):在该控制方案下三相输出电流是正弦且平衡的,但是有功功率和无功功率将出现二倍频波动;2)正负序补偿控制(positive and negative sequence compensation control, PNSC):在该控制方案下有功功率是稳定的,无功功率的波动依然存在,三相输出电流虽然是正弦的,但三相峰值电流不平衡;3)瞬时有功无功控制(instantaneous active-reactive power control, IARC):在该控制方案下,输出的有功和无功功率均是稳定的,但是三相输出电流是畸变的。为了抑制有功功率的波动,文献[3-4]中提出了一种双电流环PI控制方案,分别控制正序分量和负序分量。然而,该方案需要多个PI控制器,并且控制器的参数整定较为复杂。同时,正、负序分量的分离不可避免,增加了控制结构的复杂性。因此,一些交流信号控制器,如比例谐振控制器、准比例谐振控制器和比例积分谐振控制器也逐步应用于并网电流的控制,以避免进行正、负序电流的分离^[5-6]。针对PWM并网变流器的非线性和强耦合特性,文献[7]研究了一种改进的反馈线性化控制方案,该方法不仅能够改善系统的动态性能,而且能够提升系统的适应性。文献[8]基于Lyapunov稳定性理论研究了一种用于补偿系统谐波和无功功率的新方法,该方法的动态响应速度较快。虽然上述方法都能够有效地控制变流器并获得较好的控制效果,但它们均依赖于受控系统的精确建模。文献[9]采用了状态反馈零极点配置的方法,实现了对输出电压及电流的无差拍动态响应,降低了控制系统对模型不

确定性及参数失配的敏感性。在实际系统中,由于受环境温度及检测误差等因素的影响,可能会导致电感等线路参数的实际值与标称值之间存在偏差。参数偏差在一定程度上会影响系统的控制精度和鲁棒性。在文献[10]中提出了一种采用改进的无差拍控制策略来实现对变流器的控制,在滤波电感具有不确定性的情况下,解决了电流采样误差问题,提升了系统的鲁棒性。然而,该控制方案在电网电压不平衡情况下仅实现了对并网变流器的控制,而网侧控制只是永磁风电系统控制结构中的一部分,该控制方案未考虑风速和发电机侧的影响,其整体控制性能有待进一步验证。此外,还有一些智能控制方法也被广泛应用于变流器的控制中,如模糊控制^[11]、神经网络控制^[12-14]等。虽然这些算法对系统的模型精确性要求不高,但是却对设计者的设计经验要求较高。文献[15]提出了重复控制方法,该方法可以实现零误差跟踪、抑制干扰并提高跟踪精度,然而该控制器的响应速度较慢。

本文提出了一种在不平衡电网电压下基于灰色预测的无模型自适应控制(model-free adaptive control, MFAC)的 WECS 控制策略。机侧实现了对风能的最大功率点跟踪控制,网侧实现了对输出功率和直流母线电压的控制。将基于灰色预测的MFAC方案应用于网侧控制中,以改善参数不确定性导致的性能下降问题,提高控制系统的抗干扰能力。此外,还避免了复杂的参数整定问题。在电网电压不平衡情况下,采用所提控制方案与传统控制方案对系统进行控制并对比,对比结果表明所提控制方案可以进一步改善系统的控制性能。

1 系统模型

基于永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)的 WECS 简化结构如图1所示。PMSG通过机侧变流器和网侧变流器将发电功率传输到电网。由于中间是直流环节,机侧和网侧之间的变流器可以实现完全解耦,从而可以更好地控制系统的输出功率。

虽然在相同的滤波效果情况下,LCL型滤波器的电感小于L型滤波器的电感值,会降低设备的成本和体积。但是LCL滤波器为三阶系统,增加了二阶谐振零极点,并且参数设计也比较复杂。而L滤波器可以有效地抑制高频谐波电流,

并且不会引入谐振,其属于一阶电路,结构简单,在抑制开关频率的谐波方面效果明显。因此,在该WECS结构中选择采用L滤波器来验证控制方案的合理性。此外,考虑到目前新能源并网系

统大多使用的是LCL滤波器,在后续的研究中将会考虑LCL滤波器在WECS控制中的应用,并作为下一步的研究方向,用于验证控制方案的有效性。

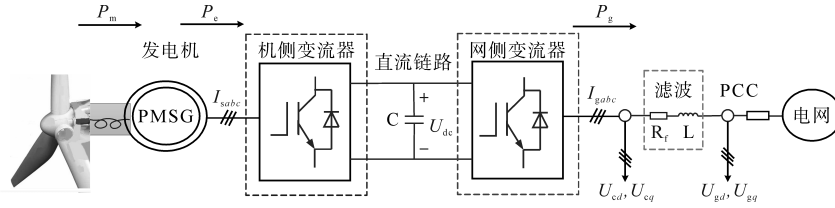


图1 WECS简化结构

Fig.1 Simplified structure of WECS

1.1 风机模型

根据空气动力学,风力机的机械功率特性可以表示为

$$P_m = 0.5\rho C_p S v^3 = 0.5\pi R^2 \rho C_p v^3 \quad (1)$$

$$\begin{cases} C_p = 0.58(116\lambda_m - 0.4\beta - 5)e^{-21\lambda_m} \\ \lambda_m = \frac{1}{\lambda + 0.008\beta} - \frac{0.0035}{\beta^3 + 1} \\ \lambda = R\omega_m/v \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_p 为风能利用系数; R 为风力机的叶片半径; λ 为叶尖速比; β 为桨距角; ω_m 为风轮角速度。

根据式(1),机械转矩可以表示为

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{1}{2\lambda} \pi \rho R^3 C_p(\beta, \lambda) v^2 \quad (3)$$

1.2 PMSG模型

PMSG在 d - q 坐标系下的电压方程可表示为

$$\begin{cases} L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} = -R_s I_{sd} + U_{sd} + \omega_e L_{sq} I_{sq} \\ L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} = -R_s I_{sq} + U_{sq} - \omega_e \Psi - \omega_e L_{sd} I_{sd} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $U_{sd}, U_{sq}, I_{sd}, I_{sq}$ 分别为定子电压和电流的 d, q 轴分量; ω_e 为转子角速度; R_s 为定子电阻; Ψ 为定子磁链。

PMSG的转子运动方程可表示为

$$T_m = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_e \quad (5)$$

式中: J 为系统的转动惯量; B 为发电机的摩擦系数。

对于隐极式永磁同步发电机而言,其电磁转矩方程可表示为

$$T_e = \frac{3n_p \Psi I_{sq}}{2} \quad (6)$$

1.3 电网模型

根据瞬时功率理论,可得输出有功和无功功率的表达式为

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{g\alpha} & u_{g\beta} \\ u_{g\beta} & -u_{g\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

三相不平衡电网电压可以分解为正序分量、负序分量以及零序分量,由于在三相三线制系统中,无零序分量的流通过程,所以零序分量不予以考虑,因此,式(1)可以被重新改写为

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_{\text{ripple}} \\ Q_0 \\ Q_{\text{ripple}} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{g\alpha}^+ i_{\alpha}^+ + u_{g\alpha}^- i_{\alpha}^- + u_{g\beta}^+ i_{\beta}^+ + u_{g\beta}^- i_{\beta}^- \\ u_{g\alpha}^+ i_{\alpha}^- + u_{g\alpha}^- i_{\alpha}^+ + u_{g\beta}^+ i_{\beta}^- + u_{g\beta}^- i_{\beta}^+ \\ u_{g\beta}^+ i_{\alpha}^+ + u_{g\beta}^- i_{\alpha}^- - u_{g\alpha}^+ i_{\beta}^+ - u_{g\alpha}^- i_{\beta}^- \\ u_{g\beta}^+ i_{\alpha}^- + u_{g\beta}^- i_{\alpha}^+ - u_{g\alpha}^+ i_{\beta}^- - u_{g\alpha}^- i_{\beta}^+ \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: P_0, Q_0 分别为有功和无功功率的直流分量; $P_{\text{ripple}}, Q_{\text{ripple}}$ 分别为有功和无功功率的波动分量。

并网变流器在 α - β 坐标系下的电压方程可表示为

$$u_{g\alpha\beta} = u_{c\alpha\beta} - R_f i_{\alpha\beta} - L \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} \quad (9)$$

式中: $u_{g\alpha\beta}, u_{c\alpha\beta}$ 分别为 α - β 坐标系下的电网电压及变流器端电压; R_f 为电阻; L 为滤波电感,主要滤除的是谐波电流; $i_{\alpha\beta}$ 为输出电流。

1.4 机侧和网侧传统控制

在理想电网情况下,永磁同步风电系统机侧变流器和网侧变流器的传统控制结构分别如图2a和图2b所示。机侧主要用于控制PMSG的转矩,并在额定风速以下实现最大风能跟踪控制。通常机侧采用 $i_d=0$ 的控制策略, i_{qref} 可以通过转矩计算出来。网侧控制采用双闭环控制结构,外环用于控制直流母线电压和无功功率,内环用于控制电流。虽然这种控制方法在正常电网下具有良好的控制性能,但当电网电压出现不平衡情况时,会导致直流母线电压及输出功率出现波动、电流产生畸变。因此,在不平衡电网电压下若要保证永磁同步风电系统取得良好的并网效果,必须对该控制策略予以修正。

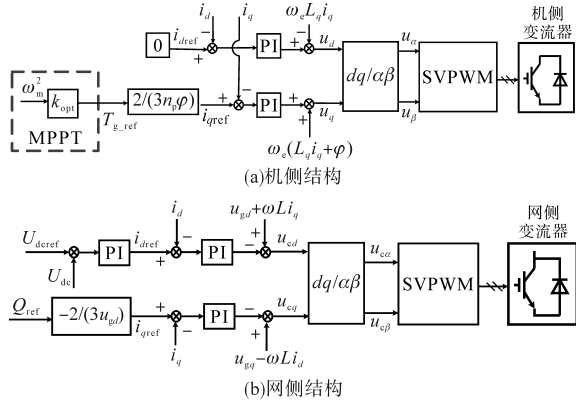


图2 机侧和网侧传统控制结构

Fig.2 Traditional control structure of machine side and grid side

2 参考电流的计算

在电网电压不平衡的情况下,系统会出现输出功率波动以及电流畸变,因此并网变流器的控制目标主要是以抑制输出有功功率波动、抑制无功功率波动以及抑制电流负序分量来展开的。

在此,选取BPSC,PNSC以及IARC这三种网侧变流器的控制方式,来验证本节所提控制方案的有效性。

1)BPSC:如果采用这种控制方式,将会抑制负序电流,虽然三相并网电流的平衡度和正弦度较高,但由于系统中还含有负序电压,负序电压和正序电流互相影响,输出功率将会出现波动。此控制方式下的电流参考表达式为

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{P^*}{u_{g\alpha}^2 + u_{g\beta}^2} \begin{bmatrix} u_{g\alpha}^+ \\ u_{g\beta}^+ \end{bmatrix} + \frac{2}{3} \frac{Q^*}{u_{g\alpha}^2 + u_{g\beta}^2} \begin{bmatrix} u_{g\beta}^+ \\ -u_{g\alpha}^+ \end{bmatrix} \quad (10)$$

2)PNSC:如果采用这种控制方式,有功功率的波动会被有效地抑制。并网电流的正弦度虽然较高,但是却不平衡,这种控制方式下的电流参考表达式为

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{2P^*}{3} \begin{bmatrix} \frac{u_{g\alpha}^+ - u_{g\alpha}^-}{u_{g\alpha}^2 + u_{g\beta}^2 - u_{g\alpha}^2 - u_{g\beta}^2} \\ \frac{u_{g\beta}^+ - u_{g\beta}^-}{u_{g\alpha}^2 + u_{g\beta}^2 - u_{g\alpha}^2 - u_{g\beta}^2} \end{bmatrix} + \frac{2Q^*}{3} \begin{bmatrix} \frac{u_{g\beta}^+ + u_{g\beta}^-}{u_{g\alpha}^2 + u_{g\beta}^2 + u_{g\alpha}^2 + u_{g\beta}^2} \\ \frac{-u_{g\alpha}^+ - u_{g\alpha}^-}{u_{g\alpha}^2 + u_{g\beta}^2 - u_{g\alpha}^2 - u_{g\beta}^2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

3)IARC:如果采用这种控制方式,系统的输出有功和无功功率均较为平滑。但三相输出电流不平衡而且畸变严重。该控制方式下的电流参考表达式为

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{P^*}{u_{g\alpha}^2 + u_{g\beta}^2} \begin{bmatrix} u_{g\alpha}^+ \\ u_{g\beta}^+ \end{bmatrix} + \frac{2}{3} \frac{Q^*}{u_{g\alpha}^2 + u_{g\beta}^2} \begin{bmatrix} u_{g\beta}^+ \\ -u_{g\alpha}^+ \end{bmatrix} \quad (12)$$

3 控制方案设计

在实际的永磁同步风电系统中可能会由于环境温度的变化以及检测误差等使网侧电路参数存在不确定性的问题,如果参数发生变化,传统控制方法的性能会下降。由于MFAC控制是一种基于数据驱动的控制,只依赖于输入和输出数据,不需要被控对象的精确模型。灰色预测算法主要用于解决“小数据”不确定性系统的预测问题,即系统中的一部分信息是已知的,同时还存在一部分未知的信息。因此,有必要研究永磁同步风电系统在参数不确定情况下基于灰色预测的MFAC控制方案,进而提高系统的抗干扰能力。

3.1 MFAC

MFAC方法是建立在伪偏导数的概念之上,基于动态线性化的模型设计控制器,并进行相应的控制理论分析。利用伪偏导数实现被控对象的动态线性化可分为紧格式、偏格式及全格式线性化方法。本节采用紧格式动态线性化的方法。

对于单输入单输出的非线性离散系统:

$$y(k+1) = f[y(k), \dots, y(k-n_y), u(k), \dots, u(k-n_u)] \quad (13)$$

式中:\$u(k)\$,\$y(k)\$分别为\$k\$时刻下的输入和输出信号;\$n_y\$,\$n_u\$为被控对象的阶数;\$f(\cdot)\$为非线性函数。针对紧格式动态线性化数据模型,首先对系统提出如下假设:

假设1:式(13)作为被控对象,其输入输出必须是可控、可观测的。

假设2:在系统的有限时刻点外,非线性函数\$f(\cdot)\$对第\$(n_y+2)\$个变量求得的偏导数是连续的。

假设3:在系统的有限时刻点外,被控对象式(13)在任意时刻\$k\$下,有\$\Delta u(k) \neq 0\$,并存在:

$$|\Delta y(k+1)| \leq b|\Delta u(k)| \quad (14)$$

$$\text{其中} \quad \begin{cases} \Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k) \\ \Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \end{cases}$$

式中:\$b\$为大于零的常数。

对于满足上述三个假设的非线性系统,当\$\Delta u(k) \neq 0\$时,存在伪偏导数,可以将被控对象式(13)表示为紧格式数据模型\$\phi(k)\$。则有:

$$\Delta y(k+1) = \phi(k) \Delta u(k) \quad (15)$$

根据式(15)的动态线性化模型,可得:

$$y(k+1) - y(k) = \phi(k)[u(k) - u(k-1)] \quad (16)$$

可进一步得出,控制输入的准则函数如下:

$$J[u(k)] = |y^*(k+1) - y(k+1)|^2 + \lambda_y |u(k) - u(k-1)|^2 \quad (17)$$

基于该准则函数,计算 $u(k)$ 的偏导数,并使其偏导数为零,即可得到MFAC的控制量为

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho\phi(k)}{\lambda_y + |\phi(k)|^2} [y^*(k+1) - y(k)] \quad (18)$$

式中: ρ 为步长因数,可以使控制器具有普适性,其选取范围为 $\rho \in (0, 1]$; λ_y 为主动引入参数,可以对输入信号变化量进行限制,保证输入信号变化的平缓性,从而保证系统输出的稳定性。

伪偏导数的准则函数可设计为

$$J[\phi(k)] = |y(k) - y(k-1) - \phi(k)\Delta u(k-1)|^2 + \mu |\phi(k) - \hat{\phi}(k)|^2 \quad (19)$$

对式(19)求极值,可得出伪偏导数 $\phi(k)$ 的估计算法为

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(k-1) + \frac{\eta\Delta u(k-1)}{\mu + \Delta u(k-1)^2} [\Delta y(k) - \hat{\phi}(k-1)\Delta u(k-1)] \quad (20)$$

式中: η 为计算伪偏导数的步长因子, $\eta \in (0, 1]$; μ 为惩罚因子,它可以限制伪偏导数的变化,并防止分母为零。

由以上分析可知,该算法可以在系统模型具有不确定性的情况下,利用数据驱动原理,通过伪偏导数的动态变化来改变控制量,从而满足系统的控制要求。MFAC的控制原理如图3所示。

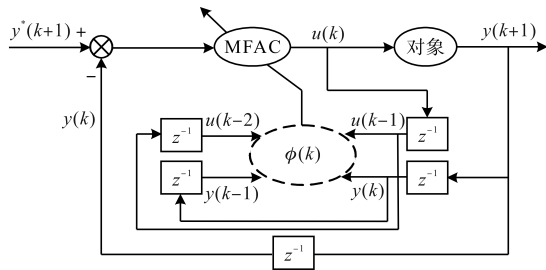


图3 MFAC控制器原理图

Fig.3 The schematic diagram of MFAC controller

3.2 灰色预测算法

灰色预测算法主要用于解决“小数据”不确定性系统的预测问题,即系统中的一部分信息是已知的,同时还存在一部分未知的信息。首先对原始数据进行分析处理,得出具有较强规律性的数据序列,进而生成匹配的预测模型实现对数据的预测。

通过建立微分方程可以得到灰色模型(grey model, GM),通常表示为 $GM(h, j)$,其中 h 为模型

阶次, j 为变量个数。本节选取模型为 $GM(1, 1)$ 模型。在 $GM(1, 1)$ 模型中,有两个需要被辨识的参数,分别为发展系数 a 和灰色作用量 u 。该算法所需参数少,计算过程简单。算法步骤如下:

1)数据处理。首先取原始非负数据序列为

$$\mathbf{x}_n = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T \quad (21)$$

式中: n 为灰色预测模型的维数; $x^{(0)}(n)$ 为原始数据。

对原始数据进行累加,可得:

$$\mathbf{x}^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3), \dots, x^{(1)}(n)]^T \quad (22)$$

其中 $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad k = 1, 2, \dots, n$

2)构造数据背景向量和数据矩阵:

$$\mathbf{y} = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T \quad (23)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -0.5[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -0.5[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -0.5[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中: $\mathbf{y}$ 为数据背景向量; $\mathbf{B}$ 为数据矩阵,即将累加后的非负数据按照均值法计算,进而形成数据序列。

3)GM辨识参数。针对 $GM(1, 1)$ 模型采用最小二乘法,即可得出需要辨识的两个参数为

$$[a, u]^T = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{y} \quad (25)$$

4)根据辨识参数,可得出时域响应模型为

$$\hat{x}^{(1)}(t) = [x^{(1)}(0) - u/a]e^{-at} + u/a \quad (26)$$

5)对时域响应模型进行离散化,得出离散化的初始数据为

$$\hat{x}^{(1)}(k) = [x^{(1)}(0) - u/a]e^{-a(k-1)} + u/a \quad (27)$$

6)还原数据。对预测出的数据进行累减,即可得出原始的预测值为

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1) \quad (28)$$

基于上述的 $GM(1, 1)$ 模型预测步骤可知,灰色预测控制是将采集来的数据按照“采一个,抛一个”的原理进行数据处理,得出此时的预测值,并与控制系统的期望值进行比较,通过MFAC控制器得出控制值,进而实现超前控制。灰色预测控制结构如图4所示,在控制过程中不需要过滤噪声,其结构简单,鲁棒性强。

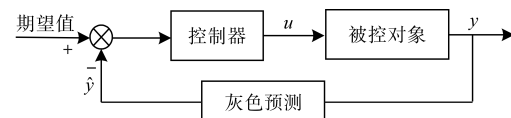


图4 灰色预测控制结构图

Fig.4 Grey predictive control structure diagram

3.3 控制方案的实现

由于电网电压的不平衡状态对发电机侧影响不大,发电机侧的控制策略仍采用 MPPT 控制,网侧则分别以实现 BPSC, IARC 和 PNSC 作为控制目标。为了提高系统在线路参数不确定性下的抗干扰能力,采用基于灰色预测的 MFAC 控制

器实现对直流母线电压的控制。另外,采用 QPR 控制器^[16]对电流进行控制,避免了正负序电流分量的分离,提高了内环控制速度,同时也因为其增大了谐振频率点附近的带宽,进而能有效避免因电网频率的偏移而引起的系统稳定性问题。所提控制方案的实现框图如图 5 所示。

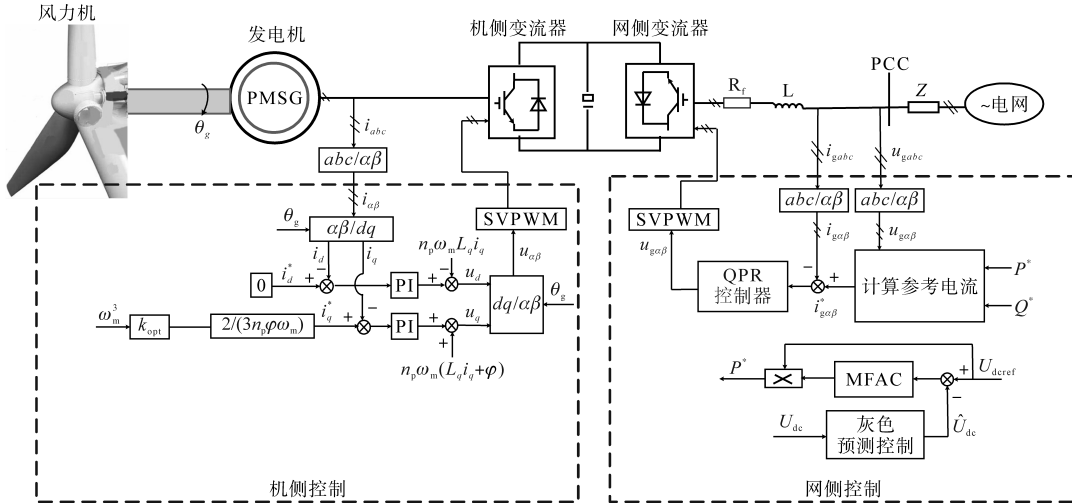


图 5 所提控制方案的实现框图

Fig.5 Implementation block diagram of the proposed control scheme

4 仿真结果分析

为了验证本文所提控制策略的有效性和优越性,采用 Matlab/Simulink 对传统控制和所提出的控制策略进行了仿真,并对仿真结果进行了对比分析。系统的主要仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
额定容量/MW	1.5	极对数	102
风轮半径/m	31	定子电感/mH	0.835
额定风速/(m·s ⁻¹)	12	母线电压/V	1 800
最大风能利用系数	0.476	电网电压/V	690
空气密度/(kg·m ⁻³)	1.225	直流侧滤波电感/mH	6
定子电阻/Ω	0.001	直流侧电阻/Ω	0.001
转子永磁磁通量/Wb	1.25	直流电容/F	0.22

为了验证所提控制方案的优越性,将所提出的控制方案与传统的双电流环 PI 控制方案进行了对比分析。在 0.2~0.4 s 内, A 相电压跌落了 30%, 以模拟不平衡电网电压, 如图 6a 所示。短时电压暂降期间的风速如图 6b 所示。

图 7 和图 8 分别为采用传统控制策略和所提控制策略来实现 BPSC, IARC 和 PNSC 这三个控

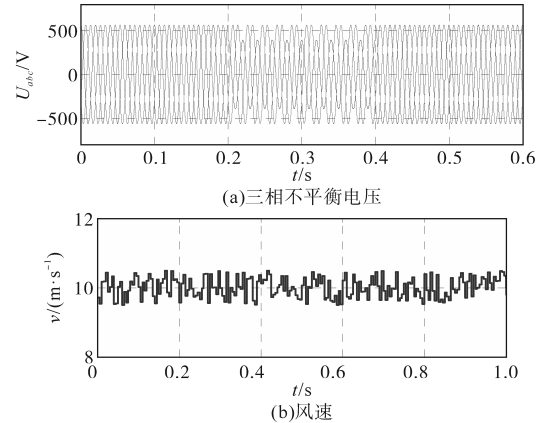


图 6 三相不平衡电压和风速

Fig.6 The three-phase unbalanced voltages and wind speed

制目标时的仿真结果。

对图 7 及图 8 进行对比可以看出, 在实现 BPSC 时, 采用传统控制策略及所提控制策略下的输出功率波动均较明显, 但采用所提控制策略下的直流母线电压超调很小, 调节时间更短, 响应时间也更快。根据 A 相电流谐波频谱分析可看出, 所提控制策略下的电流正弦度及平衡度更高, A 相电流的总谐波畸变率仅为 1.12%。在实现 IARC 时, 虽然两种控制策略下的输出功率均较为平滑, 输出电流均存在较大畸变, 但是相比之下, 所提控制策略的并网电流质量有所改善。在实现 PNSC 时, 两种控制策略下的有功功率输出

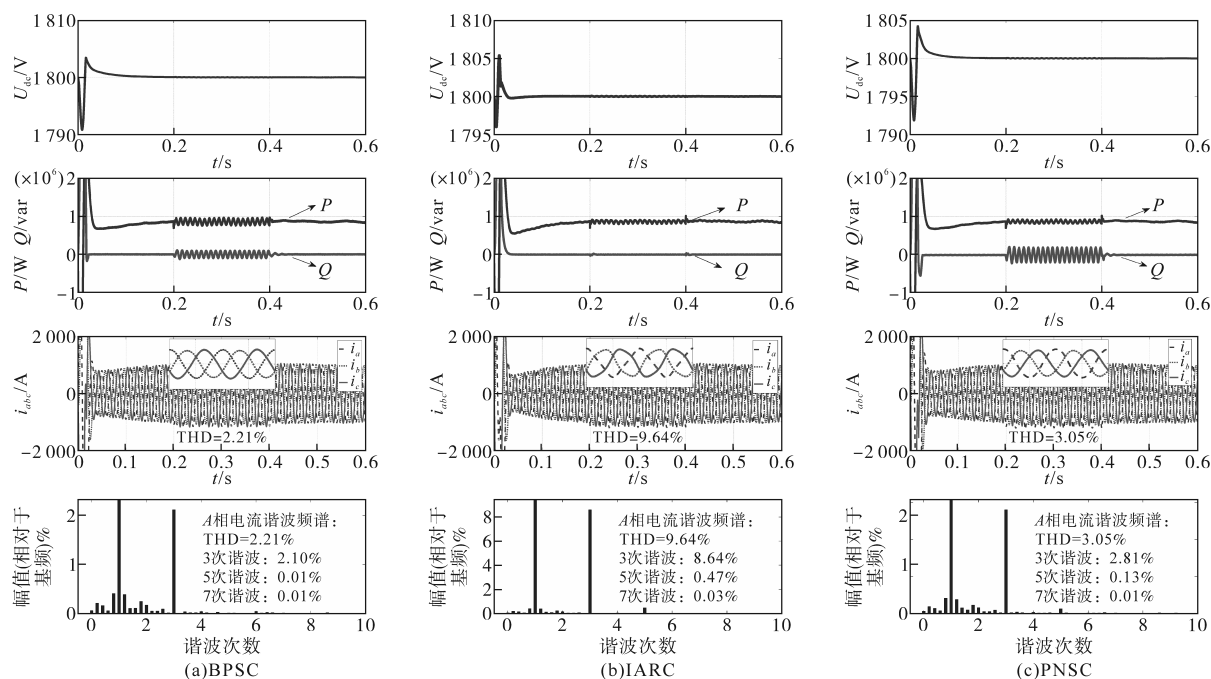


图7 传统控制方案针对不同目标的控制效果

Fig.7 The control effect of the traditional control scheme for different objectives

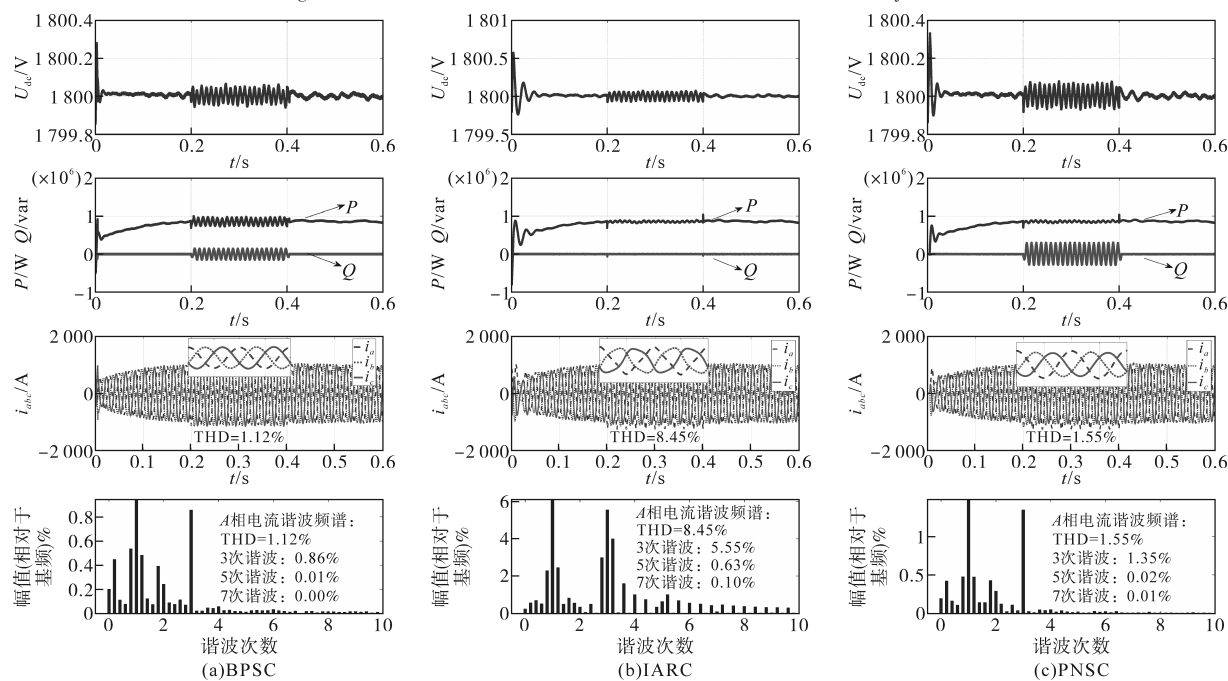


图8 所提控制方案针对不同目标的控制效果

Fig.8 The control effect of the proposed control scheme for different objectives

较平滑,无功功率的波动幅度大,但采用所提控制方案下的母线电压超调更小,输出电流的质量也有所提升,A相电流的THD仅为1.55%。综合以上分析可知,在实现三个控制目标时,所提控制策略的响应速度均较快,超调量较小,表现出了明显的优越性。

为了进一步直观地分析所提控制策略的控制性能,将传统控制策略与所提控制策略的性能

指标进行量化对比,对比结果如表2所示。由该表可看出采用所提控制方案在实现BPSC,IARC,PNSC三种目标时A相电流的THD相比于传统控制方案有所降低。除了无功功率的波动幅值在实现BPSC,PNSC时相比于传统控制方案稍有增大以外,直流母线电压波动、母线电压超调量以及有功功率的波动幅值均有所改善,验证了所提控制方案的优越性。

表 2 性能指标量化对比

Tab.2 Quantitative comparison of performance indicators

		A 相电流 THD/%				直流母线电压	直流母线电压	有功功率	无功功率
		总 THD	3 次谐波占 比	5 次谐波 占比	7 次谐波 占比	波动幅度/%	超调量/%	波动幅值/%	波动幅值/%
传统控制方案	BPSC	2.21	2.10	0.01	0.01	0.03	0.51	18.75	19.67
	IARC	9.64	8.64	0.47	0.03	0.03	0.33	14.35	5.27
	PNSC	3.05	2.81	0.13	0.01	0.02	0.39	15.12	31.26
所提控制方案	BPSC	1.12	0.86	0.01	0.00	5.50E-04	0.02	17.93	20.38
	IARC	8.45	5.55	0.63	0.10	5.30E-04	0.03	9.36	3.21
	PNSC	1.55	1.35	0.02	0.01	5.70E-04	0.02	8.27	33.23

为了更好地验证所提控制策略的动态性能,图 9 为直流电压、输出功率及电流随风速阶跃变化的仿真波形。在 0.4 s 时设置风速由 10 m/s 阶跃到 12 m/s,输出有功功率由 0.8 MW 突增至 1.5 MW。以实现 PNSC 为例,由图 9 可以看出,直流母线电压始终保持稳定,不随风速的阶跃变化而变化。同时,直流母线电压波动幅度不超过 0.005%。此外,系统输出电流和功率可以快速跟踪风速的变化,并趋于稳态。

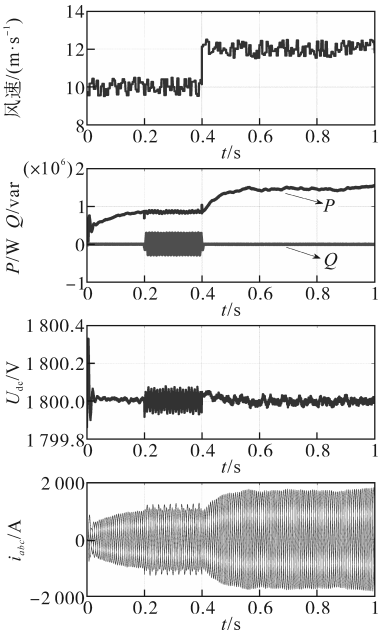


图 9 采用所提控制方案实现 PNSC 时随风速变化的仿真结果
Fig.9 Simulation results of the proposed control scheme
for PNSC changing with wind speed

在实际系统中,系统参数可能会存在不确定性。例如,由于环境温度变化以及检测误差等因素,电感等参数可能无法得到准确的测量值,导致测量值与标称值之间存在偏差。现以网侧电感作为不确定参数为例,对所提方案的有效性进行验证。电感的标称值为 6 mH,电感的不确定值为 1.2 mH。当系统采用标称参数时,本文所提控制方案与文献[5]中的无差拍控制方案的控制效

果对比如图 10a 所示。当电感值变化为 7.2 mH 时,两种控制方案的控制效果对比如图 10b 所示。以实现 IARC 为例,根据图 10 可知,在电感标称值以及电感值变化情况下,所提方案的控制效果均优于无差拍控制方案,可以有效地减小直流母线电压及输出电流的超调量和调节时间。

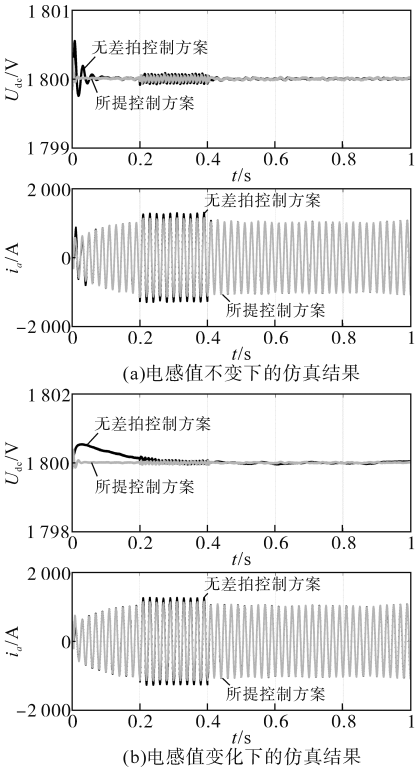


图 10 以电感作为不确定参数下实现 IARC 时传统方案与所提方案的控制效果比较
Fig.10 Comparison of control effects between traditional and proposed schemes for implementing IARC with inductance as an uncertain parameter

为了更好地验证所提方案在参数变化情况下的鲁棒性,当电感 L 变化时,采用所提控制策略下的仿真波形如图 11 所示。以实现 BPSC 为例,由该图可分析出,当网侧电路中的电感仿真参数由 $L=6$ mH 变化至 $L=7.2$ mH 时,系统的各个变量仍可以趋于稳定,控制效果良好。

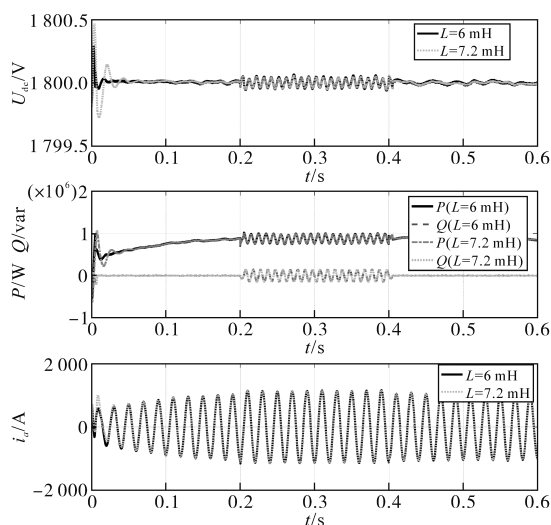


图11 当电感变化时采用所提控制实现BPSC的仿真结果

Fig.11 Control results for BPSC of the proposed scheme when inductance variation

5 结论

在电网电压不平衡情况下,针对永磁同步风电系统并网变流器中线路参数存在不确定性的问题,为了提高系统的鲁棒性,本文提出了一种基于灰色预测的MFAC策略,用来实现对永磁同步风电系统的控制。首先采用所提控制方案实现了BPSC, IARC以及PNSC,并在风速阶跃变化下验证了所提控制方案的动态跟随性能。此外,以网侧电感作为不确定参数,分别采用所提控制方案与传统控制方案对系统进行控制并对比,对比结果表明所提控制方案可以进一步改善系统的控制性能,提高了系统的鲁棒性。

参考文献

- [1] ZHOU Feihang, YANG Jianxiang, PANG Ji, et al. Research on control methods and technology for reduction of large-scale wind turbine blade vibration[J]. Energy Reports, 2023, 9: 912–923.
- [2] ZHOU F. Drive-train torsional vibration suppression of large scale PMSG-based WECS[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 1–13.
- [3] KIM K, JEUNG Y, LEE D, et al. LVRT scheme of PMSG wind power systems based on feedback linearization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2376–2384.
- [4] SUH Y, LIPO T A. Control scheme in hybrid synchronous synchronous stationary frame for PWM AC–DC converter under generalized unbalanced operating conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(3): 825–835.
- [5] 李冬辉, 孔祥洁, 刘玲玲. 单相双Buck逆变器的无差拍快速重复控制[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3671–3677.

- LI Donghui, KONG Xiangjie, LIU lingling. Deadbeat and fast repetitive control for single-phase dual-buck inverter[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3671–3677.
- [6] 赵晨聪, 刘军, 谢宙桦. 电网不平衡时电流限制的风电并网变流器功率/电流灵活控制[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(1): 137–148.
- ZHAO Chencong, LIU Jun, XIE Zhouhua. Flexible power/current control of wind power grid connected converter with current limitation under unbalanced grid voltage[J]. Electric machines and control, 2022, 26(1): 137–148.
- [7] BAO X W, ZHUO F, TIAN Y, et al. Simplified feedback linearization control of three-phase photovoltaic inverter with an LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6): 2739–2752.
- [8] HADDAD M, RAHMANI S, FNAIECH F, et al. A Lyapunov-based current control strategy of three phase shunt active power filter for harmonic elimination, power-factor correction, and load unbalance compensation[C]//Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2012.
- [9] MATTAVELLI P. An improved deadbeat control for UPS using disturbance observers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(1): 206–211.
- [10] JIANG W, MA W, WANG J, et al. Deadbeat control based on current predictive correction for grid-connected converter under unbalanced grid voltage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5479–5491.
- [11] HANG L J, LIU S S, YAN G, et al. An improved deadbeat scheme with fuzzy controller for the grid-side three phase PWM boost rectifier[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4): 1184–1191.
- [12] CHEN M, GE S S, HOW B V E. Robust adaptive neural network control for a class of uncertain MIMO nonlinear systems with input nonlinearities[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2010, 21(5): 796–812.
- [13] 谢宙桦, 赵晨聪, 黄万启. 不平衡电压下基于RBF网络并网变流器的控制[J]. 控制工程, 2020, 27(9): 1573–1581.
- XIE Zhouhua, ZHAO Chencong, HUANG Wanqi. Control of grid-connected converter based on RBF network under unbalanced voltage[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(9): 1573–1581.
- [14] 刘军, 赵晨聪. 电网电压不平衡时对风电并网变流器的控制研究[J]. 电气传动, 2016, 46(4): 50–56.
- LIU Jun, ZHAO Chencong. Research on the control strategy for grid-connecting converter of wind power generation system under unbalanced grid voltage[J]. Electric Drive, 2016, 46(4): 50–56.
- [15] ZHANG B, WANG D W, ZHOU K L, et al. Linear phase lead compensation repetitive control of a CVCF PWM inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(4): 1595–1602.

收稿日期: 2023–05–08

修改稿日期: 2023–06–28