

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205964

# 基于虚拟同步发电机和无源性控制的 DFIG 机侧控制策略<sup>\*</sup>

程启明<sup>1,2</sup>  沈章平<sup>1,2</sup>  程尹曼<sup>3</sup>  赖宇生<sup>1,2</sup>  张  昕<sup>1,2</sup>

(1. 上海电力大学自动化工程学院  上海  200090; 2. 上海市电站自动化技术重点实验室  上海  200090;  
3. 上海电力公司市北供电分公司  上海  200041)

**摘  要:**传统的双馈感应发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)矢量控制因其惯性与电网频率波动解耦而不能为电网提供额外的有功功率支持,为此在 DFIG 转子侧变流器控制中引入一种改进的虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制策略。针对传统 VSG 控制存在的频率偏差问题,通过在有功下垂环节中加入一个 Washout 滤波器,实现了在不需要增加额外 2 次控制回路情况下就能使频率保持在工频 50 Hz 附近。同时,为解决传统 VSG 中电压电流双环控制中内环电流 PI 控制存在的动态响应有限、鲁棒性不强等问题,首次在内环电流控制中引入了基于端口受控的耗散哈密顿(port controlled Hamiltonian with dissipation, PCHD)模型的无源性控制(passivity-based control, PBC)方法,设计了转子侧变流器的无源性控制器。最后,搭建了 DFIG 仿真系统进行实验验证,结果表明了本文所提控制策略的有效性和优越性。

**关键词:**双馈感应发电机;虚拟同步发电机;Washout 滤波器;端口受控的耗散哈密顿;无源性控制

**中图分类号:** TM614      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Virtual synchronous generator and PBC based cascaded control for DFIG rotor-side converter

Cheng Qiming<sup>1,2</sup>  Shen Zhangping<sup>1,2</sup>  Cheng Yinman<sup>3</sup>  Lai Yusheng<sup>1,2</sup>  Zhang Xin<sup>1,2</sup>

(1. College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;  
2. Shanghai Key Laboratory Power Station Automation Technology Laboratory, Shanghai 200090, China;  
2. North Power Supply Branch Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200041, China)

**Abstract:** With the popularity of renewable energy generators in the power grid, the traditional doubly-fed induction generator (DFIG) vector control strategy did not provide additional active power support for the power grid due to the decoupling of inertia and power grid frequency fluctuation. To solve this problem, an improved virtual synchronous generator (VSG) control strategy is introduced into the rotor-side converter (RSC) control of doubly-fed wind turbines. Aiming at the frequency deviation problem existing in the traditional VSG control strategy, a Washout filter is applied in the P-f droop link, which can keep the frequency at the stable power frequency of 50 Hz without adding additional secondary control loop. At the same time, in order to solve the problems of limited dynamic response and poor robustness of the inner loop of voltage and current control based on internal proportional integral (PI) control in traditional VSG, the port controlled hamiltonian with dissipation (PCHD) is used for the first time in this paper. The interconnection and damping assignment passivity based-control (IDA-PBC) method of PCHD model was applied to the inner loop current control. A passive controller for rotor side converter (RSC) inverter is designed. Finally, a simulation system is built for experimental verification, and the results show the effectiveness and superiority of the proposed control strategy.

**Keywords:** doubly-fed induction generator (DFIG); virtual synchronous generator (VSG); washout filter; port controlled hamiltonian with dissipation (PCHD); passivity-based control (PBC)

## 0 引言

随着可再生能源的快速发展,风力发电机在电网中的渗透率显著增加,这对风力发电机参与电力系统频率调节提出了更高的要求<sup>[1-2]</sup>。同时,DFIG 以其高效率 and 独特的结构成为风力发电系统中的关键设备<sup>[3]</sup>。但由于大多数 DFIG 是通过电子变流器并网,导致其输出的功率与电网的频率波动解耦,转子转动过程中大量的机械动能不会直接影响系统惯性<sup>[4]</sup>,这也使得 DFIG 不能像同步发电机那样直接向电网提供频率支持。如果能充分发挥 DFIG 的潜在容量余量,参与系统的频率调节,对提高现代电网安全稳定运行具有重要意义。

针对 DFIG 的运行有一些典型的控制方案,如 V/f 控制,可以提供电压支持;作为电流源工作的 PQ 控制;无需通信即可实现风电机组之间功率共享的下垂(droop)控制。然而,这些控制方案都不能为系统提供惯性支持。为了满足 DFIG 对频率调节的要求,文献[5]提出了一种虚拟惯量控制(virtual inertia control, VIC)策略,在转子侧变流器的功率基准中加入电网频率差信号,使得电网频率的波动能够影响 DFIG 有功功率的输出,从而迫使 DFIG 产生额外的功率来支持电网频率。然而这种控制策略仍然有其明显的局限性,即 DFIG 仍需要锁相环与电网同步,随着电网变得脆弱,其鲁棒性和跟踪精度无法保证。因此,有学者将 VSG 应用到 DFIG 的控制中,利用传统同步发电机的摆动方程代替锁相环与电网同步,使 DFIG 具有对频率波动的主动响应能力。

现有 VSG 技术主要包括电流源型和电压源型两种<sup>[6]</sup>。文献[7]在电流源型 VSG 控制风电系统中利用系统并网点的频率和电压的变化来改变变换器电流环控制的电流参考值,从而实现机组的功率控制,然而,此方法仅设计了电流控制回路,不能在孤岛模式下运行。文献[8-9]提出了一种支持孤岛模式的直接电压式 VSG 控制方法,通过虚拟同步外环模拟同步电机转子运动方程和励磁电压方程获得所需内电势的幅值和相角,直接进行矢量合成并通过 PWM 调制技术获得变换器驱动信号,但它只设计了电压控制回路,因此缺乏限流能力。在此基础上,文献[10]提出了改进的电压电流级联内环控制的间接式 VSG 控制方法,其含有电压电流控制内环,可以快速响应系统电压电流的变化,抑制故障情况下电流瞬变,但这种方法仍然继承了传统线性控制的缺点,存在着动态响应慢、鲁棒性差等问题。

虽然有学者从改善 DFIG 惯性支持的方面进行了不少的研究,但这些研究大多是基于 DFIG 线性化模型来

进行分析的,从而忽略了 DFIG 非线性结构对其动态特性的影响,同时各种外界的影响以及人为的因素都会导致 DFIG 参数的不确定性。因此,DFIG 控制策略在设计时应当充分考虑系统的不确定性、外部扰动以及整个系统的非线性。在文献[11]中,作者设计了一种反步滑模控制策略,通过设计反步滑模控制器使双馈电机实现了鲁棒调节。文献[12]针对 DFIG 的非线性模型设计了一种分数阶滑模控制器,通过对 DFIG 不确定参数以及外部扰动的估计,增强了系统的鲁棒性。文献[13-14]使用了模型预测控制取代传统的线性控制,通过预测被控变量的未来行为改善了系统在电网故障和参数不确定情况下的调节性能。文献[15]设计了一种反馈线性化和变结构控制器,用于 DFIG 转子侧变流器控制回路以抑制次同步控制相互作用,有效增强了系统抗干扰能力。

到目前为止,学者们已经提出了不少的控制策略来提高 DFIG 的频率调节能力,如 VSG、虚拟惯量控制等,也基于 DFIG 非线性模型设计了非线性鲁棒控制器以改善系统的鲁棒性和动态响应。然而这些单一的控制策略仍存在着不足之处。基于 DFIG 线性化模型设计的 VSG 控制策略没有充分考虑 DFIG 系统的非线性结构的影响,而已有的非线性控制策略不能为 DFIG 提供足够的惯性和阻尼力。

因此,对于 DFIG 系统,本文先设计了带 Washout 滤波器的 VSG 控制器以增加系统的惯性与阻尼<sup>[16]</sup>。其中,所用的改进型 VSG 控制方法在不需要设计额外 2 次控制回路的情况下就能消除频率的稳态偏差,结构简单,经济性好;然后,对传统 VSG 的线性 PI 控制器进行改进,电流内环首次采用基于端口受控的耗散哈密顿(port-controlled Hamilton with dissipation, PCHD)的互联和阻尼配置(interconnection and damping assignment, IDA)的无源性控制(passivity-based control, PBC)这种非线性控制器(简称 IDA-PBC)<sup>[17]</sup>,创新性地把将 PBC 和 VSG 相融合的控制方法引入到 DFIG 的控制上来,使得 DFIG 既能给系统提供足够的惯性和阻尼,同时还保证了较好的动态响应特性、对扰动的鲁棒性以及良好的控制稳态性能;最后,通过仿真实验结果验证本文所提出的控制策略在孤岛、并网两种运行状态下相较于常用的其他控制策略,具有更快的动态响应速度、更低的谐波含量以及更好的鲁棒性。

## 1 双馈异步风力发电机数学模型

### 1.1 两相旋转坐标系下 DFIG 数学模型

DFIG 电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega\psi_{sq} \\ \omega\psi_{sd} \\ -(\omega - \omega_r)\psi_{rq} \\ (\omega - \omega_r)\psi_{rd} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$ 、 $u_{rd}$ 、 $u_{rq}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴上定、转子电压分量;  $R_s$ 、 $R_r$  分别为定、转子的等效电阻;  $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 、 $i_{rd}$ 、 $i_{rq}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴上定、转子电流分量;  $\psi_{sd}$ 、 $\psi_{sq}$ 、 $\psi_{rd}$ 、 $\psi_{rq}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴上定、转子绕组磁链分量;  $\omega$  为定子同步旋转角速度;  $\omega_r$  为转子旋转角速度。

DFIG 磁链方程为:

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $L_m$  为  $dq$  坐标系中定、转子同轴之间的互感;  $L_s$  为  $dq$  坐标系中定子绕组的等效自感,  $L_r$  为  $dq$  坐标系中转子绕组的等效自感。

## 1.2 DFIG 哈密顿形式数学模型

无源性控制(PBC)策略实质是通过系统能量变化与物理变量之间的联系合理设计反馈稳定控制器,利用控制器往系统中注入控制能量以保持整个系统的能量动态平衡。只要系统的能量能得到合理的控制,那么所要控制的系统变量自然就能达到预期控制效果。

而 PCHD 方程的引入使得利用无源性控制理论对系统的求解变得更加规范和简化,使得能量方程中的各变量有了明确的物理意义。为简化设计,通常将互联和阻尼分配法(IDA)应用到基于 PCHD 模型的无源性控制器设计中,通过合适的互联和阻尼分配使得系统在预期的平衡点处能有最小能量,使系统达到稳态。

PCHD 系统的基本形式为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{g}^T(\mathbf{x}) \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{x}$  为系统的状态变量矩阵;  $\mathbf{R}(\mathbf{x})$  为系统的耗散矩阵,正定且有对称性;  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  为反映系统控制量对系统状态变量作用的状态变量矩阵;  $\mathbf{u}$  为系统控制变量矩阵;  $\mathbf{y}$  为系统输出变量;  $\mathbf{J}(\mathbf{x})$  为系统互联矩阵,且为反对称矩阵;  $H(\mathbf{x})$  为系统能量存储函数。

易得能量平衡时  $dH/dt = \mathbf{u}^T \mathbf{y}$ , 这表明系统是无损的,

此时式(3)被称为具有结构  $\mathbf{J}(\mathbf{x})$  和哈密顿能量函数  $H(\mathbf{x})$  的端口受控的哈密顿系统。当  $\mathbf{R}(\mathbf{x})$  为半正定对称矩阵时,表示为端口受控的耗散哈密顿系统。此时,能量平衡变为:

$$\frac{dH(\mathbf{x})}{dt} = \mathbf{u}^T \mathbf{y} - \frac{\partial H^T(\mathbf{x})}{\partial t} \mathbf{R}(\mathbf{x}) \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial t} \leq \mathbf{u}^T \mathbf{y} \quad (4)$$

式(4)表明了 PCHD 系统的严格无源性,合理设计系统的无源性控制器的前提是能保证系统的严格无源性以利用能量的耗散使系统达到稳态。

将 DFIG 的磁链方程(2)代入电压方程(1)并重新改写成:

$$\mathbf{L}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\omega, \omega_r)\mathbf{q} + \mathbf{R}\mathbf{q} = \mathbf{u} \quad (5)$$

其中:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & -(\omega - \omega_r)L_r \\ (\omega - \omega_r)L_r & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix}, \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix}, \mathbf{q} = \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix}$$

选取系统的能量存储函数:

$$H = \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{L} \mathbf{q} \quad (6)$$

对上述能量存储函数求偏导可得:

$$\frac{\partial H}{\partial \mathbf{q}} = \begin{bmatrix} L_r i_{rd} \\ L_r i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \mathbf{L} \mathbf{q} \quad (7)$$

由此可到:

$$\mathbf{q} = \mathbf{L}^{-1} \frac{\partial H}{\partial \mathbf{q}} \quad (8)$$

因此由式(5)可以得到 DFIG 机侧的 PCHD 模型为:

$$\dot{\mathbf{q}} = -\mathbf{L}^{-1} \mathbf{C} \mathbf{L}^{-1} \frac{\partial H}{\partial \mathbf{q}} - \mathbf{L}^{-1} \mathbf{R} \mathbf{L}^{-1} \frac{\partial H}{\partial \mathbf{q}} + \mathbf{L}^{-1} \mathbf{u} \quad (9)$$

取  $\mathbf{J} = -\mathbf{L}^{-1} \mathbf{C} \mathbf{L}^{-1} = -\mathbf{J}^T$ ,  $\mathbf{R}_p = \mathbf{L}^{-1} \mathbf{R} \mathbf{L}^{-1}$ ,  $\mathbf{g} = \mathbf{L}^{-1}$ , 因此可以得到 DFIG 机侧的 PCHD 模型为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{q}} = [\mathbf{J} - \mathbf{R}_p] \frac{\partial H}{\partial \mathbf{q}} + \mathbf{g} \mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{g}^T(\mathbf{q}) \frac{\partial H}{\partial \mathbf{q}} \end{cases} \quad (10)$$

将式(6)的能量函数对时间求导可得:

$$\dot{H} = \mathbf{q}^T \mathbf{L} \mathbf{g} \mathbf{u} - \mathbf{q}^T \mathbf{L} \mathbf{R}_p \mathbf{L} \mathbf{q} \quad (11)$$

对式(11)两边同时积分可得:

$$H(t) - H(0) = \int_0^t \mathbf{q}^T \mathbf{L} \mathbf{g} \mathbf{u} d\tau - \int_0^t \mathbf{q}^T \mathbf{L} \mathbf{R}_p \mathbf{L} \mathbf{q} d\tau =$$

$$\int_0^t \mathbf{q}^T \mathbf{L} \mathbf{g} \mathbf{u} d\tau - \int_0^t Q_c d\tau < \int_0^t \mathbf{q}^T \mathbf{L} \mathbf{g} \mathbf{u} d\tau \quad (12)$$

本文将系统在 0 时刻的能量和表示为  $H(0)$  而把系统在  $t$  时刻的能量和表示为  $H(t)$ , 可见无源不等式的左端就表示系统  $t$  时刻相对于 0 时刻的能量增加值。则无源不等式的右端表示  $t$  时刻相对于 0 时刻外界注入系统

的能量之和。由于  $\mathbf{q}^T \mathbf{R}_p \mathbf{q} = R_r i_{rd}^2 + R_r i_{rq}^2$  为正定,且  $\mathbf{L}$  为正定对称矩阵,且  $\mathbf{Q}_e = \mathbf{q}^T \mathbf{L} \mathbf{R}_p \mathbf{L} \mathbf{q} > 0$ ,由式(12)可知,外界注入的能量要大于整个 DFIG 系统所增加的能量,由此说明了该系统是严格无源的。根据无源性控制的理论可知,严格无源的系统一定可以采用无源性控制且是大范围稳定的<sup>[18]</sup>。

## 2 内环电流的无源性控制器设计

无源性控制的核心是利用系统的无源性原理,即系统总增加能量要小于外部注入能量。通过选取和确定合适的能量存储函数以使得系统在满足全局渐进稳定条件下收敛到目标期望点。本文选用 IDA-PBC 方法来设计无源性控制器,其实质是确定一个控制规律  $\mathbf{u}$ ,使系统的闭环 PCHD 模型为:

$$\dot{\mathbf{q}} = [\mathbf{J}_d - \mathbf{R}_d] \frac{\partial H_d}{\partial \mathbf{q}} \quad (13)$$

其中:

$$\mathbf{J}_d = \mathbf{J} + \mathbf{J}_a, \mathbf{R}_d = \mathbf{R}_p + \mathbf{R}_a$$

式中:  $\mathbf{J}_d$ 、 $\mathbf{R}_d$  分别为新的互联、耗散矩阵;  $\mathbf{J}_a$ 、 $\mathbf{R}_a$  为注入互联矩阵和阻尼矩阵;  $H_d = H + H_a$  为总的能量存储函数。

为简化无源性控制器的设计,取系统的能量函数为:

$$\begin{cases} H = \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{L} \mathbf{q} \\ H_d = \frac{1}{2} \mathbf{q}_e^T \mathbf{L} \mathbf{q}_e, \mathbf{q}_e = \mathbf{q} - \mathbf{q}^* \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{q}^* = [i_{rd}^* \ i_{rq}^*]^T$  为电流的给定值。

根据结构守恒,选取新注入的互联和阻尼矩阵为:

$$\mathbf{J}_a = \mathbf{L}^{-1} \begin{bmatrix} 0 & -J_1 \\ J_1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{L}^{-1}, \mathbf{R}_a = \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中,由于  $\mathbf{L}$  为正定对角矩阵且  $\partial H / \partial \mathbf{q} = \mathbf{L} \mathbf{q}$ 、 $\partial H_d / \partial \mathbf{q} = \mathbf{L} \mathbf{q}_e$ ,因此可得:

$$\frac{\partial H_a}{\partial \mathbf{q}} = \frac{\partial H_d}{\partial \mathbf{q}} - \frac{\partial H}{\partial \mathbf{q}} = -\mathbf{L} \mathbf{q}^* \quad (16)$$

在  $\mathbf{q}^*$  处  $\partial H_d / \partial \mathbf{q} = \mathbf{L} \mathbf{q}_e = 0$ ,且  $\partial^2 H_d / \partial \mathbf{q}^2 = \mathbf{L}$ ,  $|\mathbf{L}| > 0$ ,说明在  $\mathbf{q}^*$  处,  $H_d$  有最小值,由此可以得到 DFIG 机侧耗散哈密顿模型的控制规律为:

$$\mathbf{u} = \mathbf{g}^{-1}([\mathbf{J}_a - \mathbf{R}_a] \mathbf{L} \mathbf{q} - [\mathbf{J}_d - \mathbf{R}_d] \mathbf{L} \mathbf{q}^*) \quad (17)$$

将式(10)、(14)、(15)、(16)代入式(17)就可以得到 DFIG 机侧基于 PCHD 模型的 IDA-PBC 无源性控制器的控制规律为:

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd}^* - (\omega - \omega_r) L_r i_{rq}^* - L_r^2 r_1 (i_{rd} - i_{rd}^*) + J_1 (i_{rq}^* - i_{rq}) \\ u_{rq} = R_r i_{rq}^* + (\omega - \omega_r) L_r i_{rd}^* - L_r^2 r_2 (i_{rq} - i_{rq}^*) + J_1 (i_{rd}^* - i_{rd}) \end{cases} \quad (18)$$

## 3 中环电压的控制器设计

为了使 DFIG 在弱电网以及孤岛运行中有更好的电压支撑作用,在建模时采用电压矢量定向的电压源控制策略。可以采用 PI 控制器对 VSG 外环产生的参考电压进行跟踪。本文采用了一种定子电压控制策略<sup>[19]</sup>,对定子电压的  $d$ 、 $q$  轴分量进行闭环控制。定子侧负载电流作为扰动量暂不考虑,则前文所述的 DFIG 的式(1)定子电压方程和式(2)磁链方程可改写为:

$$\begin{cases} u_{sd} = \frac{d}{dt} \psi_{sd} - (\omega - \omega_r) \psi_{sq} \\ u_{sq} = \frac{d}{dt} \psi_{sq} + (\omega - \omega_r) \psi_{sd} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_m i_{rq} \end{cases} \quad (20)$$

把式(20)代入式(19)且只考虑稳态项,则定子电压方程可进一步改写为:

$$\begin{cases} u_{sd} = -(\omega - \omega_r) \psi_{sq} = -(\omega - \omega_r) L_m i_{rq} \\ u_{sq} = (\omega - \omega_r) \psi_{sd} = (\omega - \omega_r) L_m i_{rd} \end{cases} \quad (21)$$

由式(21)可见,定子电压到转子电流之间的交叉控制,可通过对  $i_{rd}$ 、 $i_{rq}$  分别使用相应控制器即可实现对定子电压的控制,同时得到内环无源性控制器所需的转子电流参考量  $i_{rd}^*$ 、 $i_{rq}^*$ 。

根据电压定向控制,可将  $d$  轴的电压指令设置为 0,也即:

$$u_{sd} = 0, u_{sq} = |U_s| \quad (22)$$

由此电压环控制器可设计为:

$$\begin{cases} i_{rq}^* = -(k_{pu} + k_{iu}/s)(0 - u_{sd}) \\ i_{rd}^* = (k_{pu} + k_{iu}/s)(u_{ref} - u_{sq}) \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $k_{pu}$ 、 $k_{iu}$  分别为 PI 控制器的比例积分系数;  $u_{ref}$  为功率外环输出的电压参考值。

## 4 基于虚拟同步控制的 DFIG 功率外环设计

VSG 控制可以通过使用一定的控制策略使得 DFIG 表现出与同步发电机相似的调频特性,为 DFIG 系统提供一定的惯性支持,本文采用了一种改进型的电压控制 VSG 方案来替代传统的下垂控制,这也为内部控制回路提供了电压参考。图 1 为电压控制型 VSG 结构框图,它由虚拟调速器、摇摆方程、无功功率控制 3 个部分组成。

### 4.1 有功功率-频率的控制

在 VSG 中,虚拟调速器旨在通过有功-频率下垂控制 (droop) 来模拟同步发电机的调速器,其中虚拟调速器可表达为:



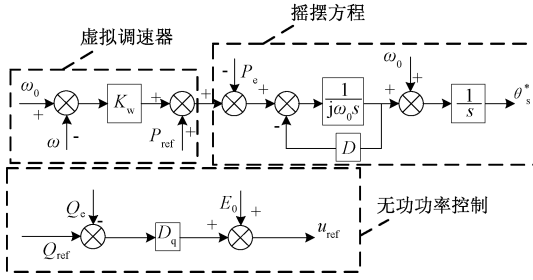


图1 电压控制型VSG结构框图

Fig. 1 Block diagram of voltage controlled VSG structure

$$P_m = P_{ref} + K_w(\omega_0 - \omega) \quad (24)$$

式中： $P_m$  为原动机输入的机械功率； $P_{ref}$  为给定的参考有功功率； $\omega$ 、 $\omega_0$  分别为转子电角速度的实际值、给定值； $K_w$  为功频调差系数，其表达式可写成：

$$K_w = (P_{max} - P) / (\omega - \omega_{min}) \quad (25)$$

式中： $P_{max}$  为DFIG在频率变化时允许输出的最大有功功率； $\omega_{min}$  为DFIG输出最大有功功率时对应的最小频率。

下垂控制为有差调节，当孤岛系统负载发生突变导致频率出现偏差，不能很好的恢复给定的频率，严重时甚至会超出供电频率允许误差范围。为弥补下垂控制的这一缺陷，引入了图2所示2次控制来消除频率的偏差，从而提高系统的稳定性。

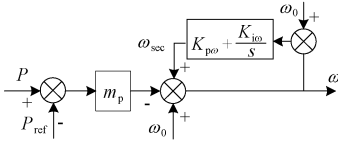


图2 频率2次控制结构框图

Fig. 2 Block diagram of frequency secondary control structure

通过2次控制补偿频率偏差后输出的频率值可表达为：

$$\omega = \omega_0 - m_p(P - P_{ref}) + \omega_{sec} \quad (26)$$

式中： $P$  为原动机输入的实际有功功率； $P_{ref}$  为给定的参考有功功率； $m_p = 1/K_w$ ； $\omega_{sec}$  为频率补偿项，它可由下式得到：

$$\omega_{sec} = (\omega_0 - \omega) G_{\omega, sec} = (\omega_0 - (\omega_0 - m_p(P - P_{ref}) + \omega_{sec})) G_{\omega, sec} \quad (27)$$

$$G_{\omega, sec} = k_{p\omega} + k_{i\omega}/s \quad (28)$$

将式(28)代入式(27)可得到：

$$\omega_{sec} = \frac{m_p}{1/G_{\omega, sec} + 1} (\omega - \omega_0) \quad (29)$$

此外，对于孤岛运行状态，参考功率 $P_{ref}$ 和 $Q_{ref}$ 被设置为0<sup>[20]</sup>。将式(26)与(29)结合可得：

$$\omega = \omega_0 - \frac{m_p}{k_{p\omega} + 1} \cdot \frac{s}{s + k_{i\omega}/(k_{p\omega} + 1)} \cdot P \quad (30)$$

因此，从式(29)和(30)可以得到一种基于Washout滤波器的广义功率共享策略。注意，当满足条件 $k_{p\omega} = 0$ 和 $k_{i\omega} = k_p$ 时，可以实现基于Washout滤波器的控制策略，其中 $k_p$ 是Washout滤波器的控制参数。此外，基于Washout滤波器的功率共享策略本质上是一种理想的无通信延迟的2次控制策略。

图3为改进有功控制环节结构图。图中，将Washout滤波器应用到VSG的虚拟调速器中，改进后的有功频率下垂特性方程可表示为：

$$P = P_{ref} + (\omega_0 - \omega) \frac{s + k_p}{m_p s} \quad (31)$$

式中： $k_p$ 为控制系数，本文取值为1 000。

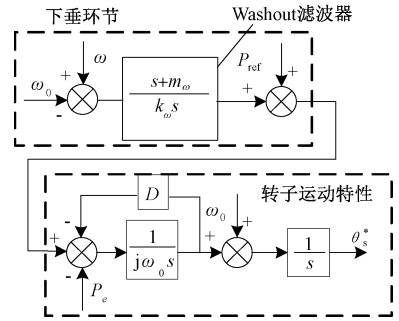


图3 改进有功控制环节结构图

Fig. 3 Improved active power control link structure diagram

Washout滤波器为1阶高通滤波器，它抑制直流分量并传递信号的暂态分量。在反馈路径中使用Washout滤波器的主要优点是使系统的目标运行点对参数不确定性具有鲁棒性，因此借助Washout滤波器的动态反馈可保持系统的频率稳定。

为模拟转子惯性特性，在控制部分引入简化的摆动方程，当设置VSG的极对数为1以及忽略同步发电机的机械损耗等因素时，可将转子运动方程表达为：

$$\begin{cases} P_m - P_e - D(\omega - \omega_0) = J\omega \frac{d\omega}{dt} \approx J\omega \frac{d\omega_0}{dt} \\ \theta = \omega/s \end{cases} \quad (32)$$

式中： $\theta$ 、 $P_e$ 、 $D$ 和 $J$ 分别为功角、电磁功率、阻尼因子和转动惯量。

#### 4.2 无功功率-电压的控制

无功电压控制器旨在对同步发电机外特性的模拟。因此，针对VSG无功电压控制器的设计，可以采用无功电压下垂关系，其表达式为：

$$E = E_0 + D_q(Q_{ref} - Q_e) \quad (33)$$

式中： $E_0$ 为电压给定值； $D_q$ 为无功电压下垂系数； $Q_e$ 、 $Q_{ref}$ 分别为瞬时无功功率和无功参考值。

综上所述，基于VSG和PBC结合的DFIG的总体控制系统框图如图4所示。本系统由基于VSG的功率外



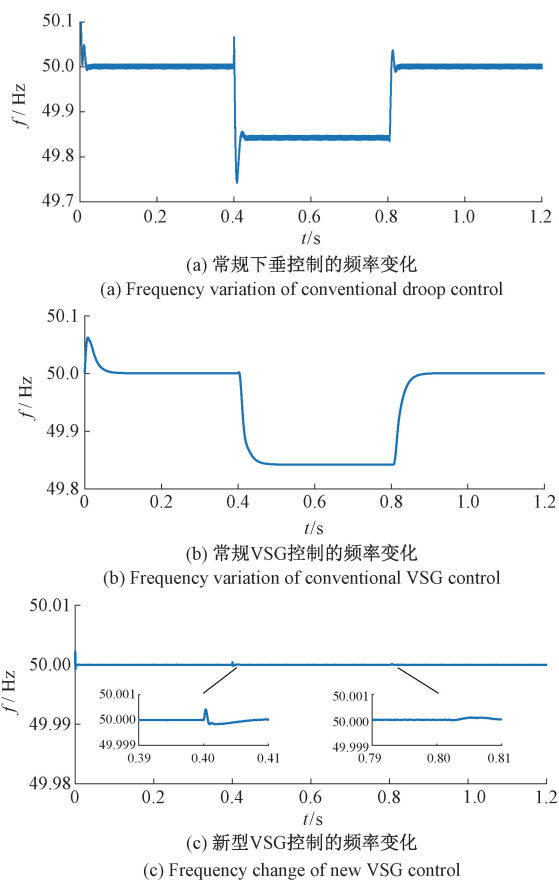


图5 孤岛负荷阶跃变化频率变化情况

Fig. 5 Frequency variation of load step change

良好的跟踪性能,本文控制策略下的电压谐波畸变率 (total harmonic distortion, THD) 仅为 0.14%, 小于传统 PI-VSG 控制下电压 THD 0.17%。

由图 10 可见,非线性负载电流引起的谐波电压下降会使输出电压发生变形。在 PI-VSG 控制作用下,由非线性电流引起的谐波效应使输出电压 THD 为 5.71%, 而本文所提 PBC-VSG 控制可将输出 THD 降为 4.23%。

## 5.2 并网运行工况仿真分析

为了验证本文所提控制方法在并网运行状态下的优越性,在 MATLAB/Simulink 中进行仿真分析。对并网状态下 DFIG 分别进行了功率环扰动响应仿真以及功率环输入响应仿真。

当并网运行时,通过电网模拟器设置电网在 1 s 时刻频率骤降 0.2 Hz,此时 DFIG 输出频率和有功功率如图 11 所示。由图可见,在频率突变时,在 PBC-PQ 模式下由于锁相环能快速锁定电网频率,故该模式下频率会发生垂直骤降,而不像 PBC-VSG 模式存在着惯性。另外,在电网频率扰动发生时,PBC-VSG 模式控制下的 DFIG 会产生附加功率以支撑系统频率的恢复。

图 12 为 PBC-VSG 和 PBC-PQ 控制方法的功率环扰

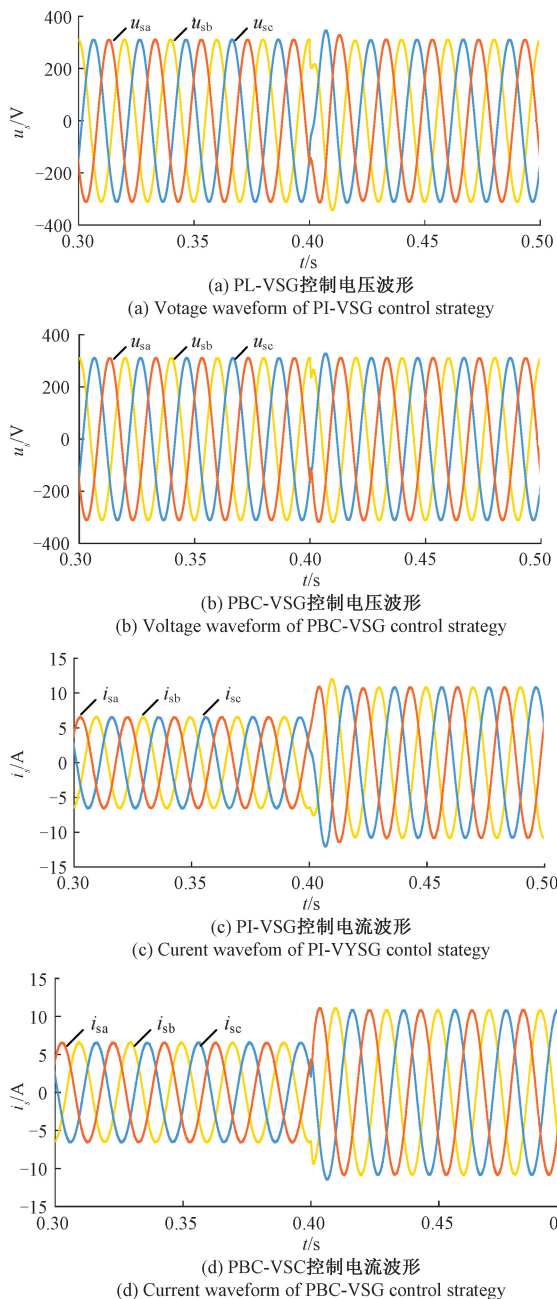


图6 孤岛系统响应负载变化的电压和电流波形

Fig. 6 Voltage and current waveforms of islanded systems in response to load changes

动响应波形。在 1 s 时刻设置两者的有功功率指令值由 3 kW 突变为 6 kW。由图可见,在有功功率设定值发生变化时,由于 DFIG 功率和频率之间的解耦,PBC-PQ 控制下的频率不会有所响应,且有功功率变化迅速。而 PBC-VSG 模式将输出频率和输出有功功率相耦合,从而使得有功功率变化更为柔和,更进一步说明了 PBC-VSG 控制下的系统存在有惯性,能使得 DFIG 输出有功和频率联系起来。

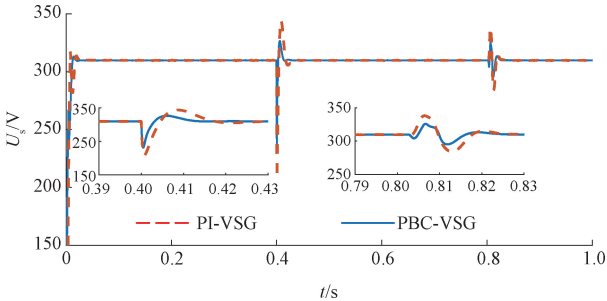


图 7 孤岛负载变化时输出电压幅值对比  
Fig. 7 Output voltage amplitude comparison under islanded load changes

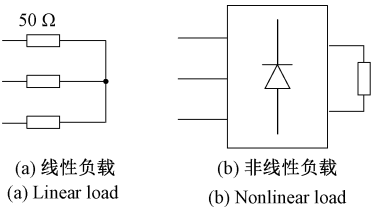


图 8 不同负载的线路类型  
Fig. 8 Line types for different loads

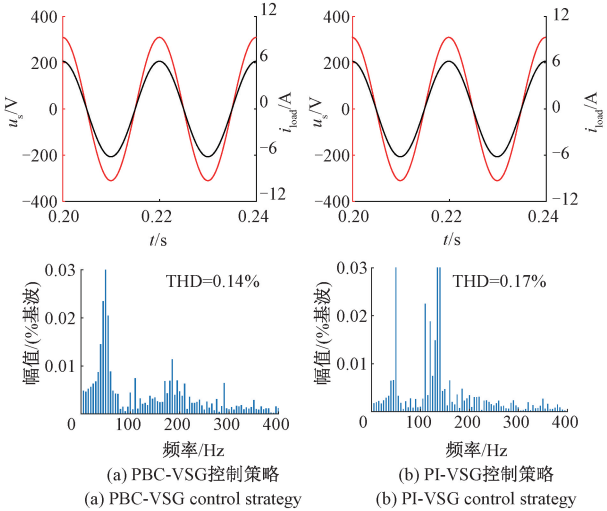


图 9 线性负荷下的电压质量比较  
Fig. 9 Voltage quality comparison under linear load

为了进一步说明本文所提的无源内环的 VSG 控制策略的优越性,将其与传统 PI-VSG 作对比。图 13 为 PBC-VSG 和 PI-VSG 控制方法下 DFIG 输出电压 FFT 分析图。由图可见,本文的 PBC-VSG 作为一种非线性控制策略,针对 DFIG 这种非线性补控对象,相比传统线性 PI 控制有更好的谐波抑制能力。

此外,为了更好地凸显所改进的无源性控制内环的优势,只对电压控制回路进行测试,以比较其稳态和动态

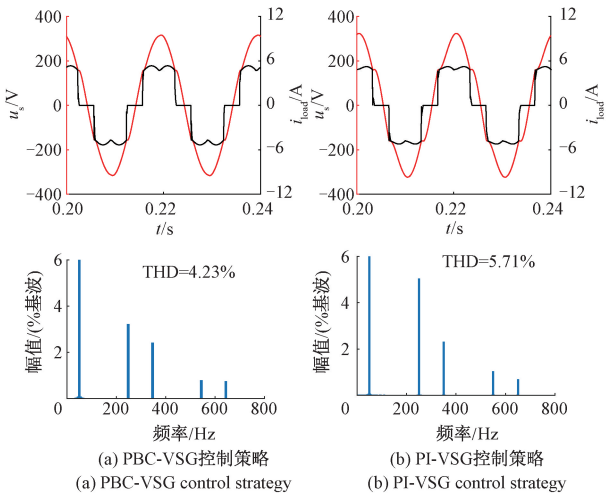


图 10 非线性负荷下的电压质量比较  
Fig. 10 Voltage quality comparison under nonlinear load

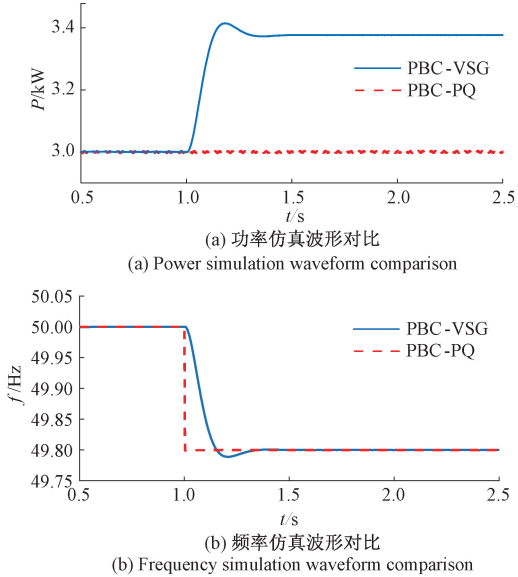
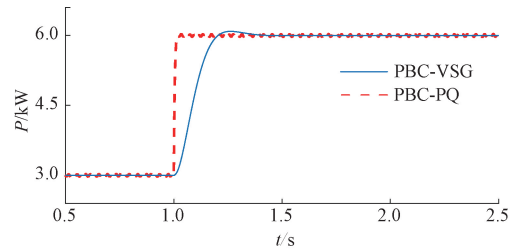


图 11 功率环扰动响应波形  
Fig. 11 Power loop disturbance response waveform

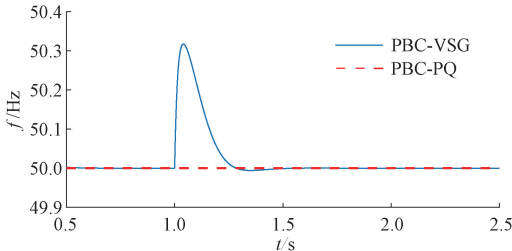
控制性能。

图 14 显示了在参考电压阶跃变化下,分别使用常规 PI 线性控制和所提 PBC 方法的电压响应测试结果。由图可见,传统 PI 线性控制方法的电压波动和调整时间大于所提 PBC 控制方法。虽然 PI 参数可以进行调整以获得更好的控制性能,但由于这两个目标具有内在的抑制性,很难平衡稳态和动态控制性能,且 PI 控制策略下稳态时存在着一定的波动。因此,相较于线性 PI 控制策略,本文使用的 PBC 控制策略可以获得较优的动态控制性能,且稳态控制性能也较好,相比与 PI 控制更易获得平衡的控制性能。





(a) 功率仿真波形对比  
(a) Power simulation waveform comparison



(b) 频率仿真波形对比  
(b) Frequency simulation waveform comparison

图 12 功率环输入响应波形

Fig. 12 Power loop input response waveform

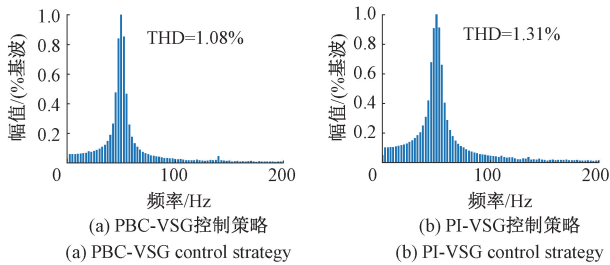


图 13 两种控制策略下输出电压 FFT 分析

Fig. 13 FFT analysis of output voltage  
under two control strategies

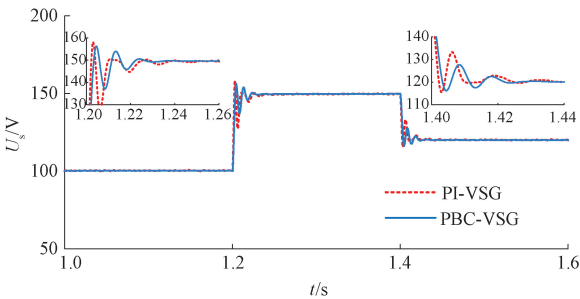


图 14 电压电流内环动态响应对比

Fig. 14 Comparison of dynamic response of  
voltage and current inner loop

根据图 7、9、10、13、14 的结果对比可以看出,相较于传统的线性 PI-VSG,本文所提的新型 VSG 策略超调量更小、动态响应更快、电压谐波畸变率更小,有着更加平衡的动、静态性能。

根据图 11、12 的结果对比可以看出,相较于 PBC 鲁棒控制,本文所提的新型 VSG 策略在改善 DFIG 的鲁棒性和动态响应的同时,也为 DFIG 提供足够的惯性和阻尼力。

## 6 结 论

本文将 VSG 控制与基于 PCHD 模型的 PBC 相结合用于 DFIG 的控制中。针对 DFIG 在 VSG 控制下存在频率偏差的问题,本文通过在 VSG 的有功-频率下垂控制环节中引入了 Washout 滤波器以消除频率偏差,然后引入了基于端口受控的耗散哈密顿模型的无源性控制方法,提高了内环控制的动态性能和鲁棒性。本文所提的新型 VSG 控制策略既保留了传统 VSG 控制策略的惯性与阻尼特性,又具有无源性控制抗干扰能力强、动态响应速度快、参数易调节等优点,为 DFIG 的安全稳定运行提供了双重的保障。但文中所选取的固定的虚拟惯量系数和阻尼系数不能使 VSG 控制效果达到最优化,后续研究中将加入自适应算法加以改进。

## 参考文献

[ 1 ] YOO J I, KANG Y C, MULJADI E, et al. Frequency stability support of a DFIG to improve the settling frequency[J]. IEEE Access, 2020, 8: 22473-22482.

[ 2 ] PRASAD R, PADHY N P. Synergistic frequency regulation control mechanism for DFIG wind turbines with optimal pitch dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3181-3191.

[ 3 ] CAI L J, ERLICH I. Doubly fed induction generator controller design for the stable operation in weak grids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 1078-1084.

[ 4 ] 唐西胜, 苗福丰, 齐智平, 等. 风力发电的调频技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4304-4314.

TANG X SH, MIAO F F, QI ZH P, et al. Survey on frequency control of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4304-4314.

[ 5 ] 张琛, 蔡旭, 李征. 具有自主电网同步与弱网稳定运行能力的双馈风电机组控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 476-485.

ZHANG CH, CAI X, LI ZH. Control of DFIG-based wind turbines with the capability of automatic grid-synchronization and stable operation under weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 476-485.

[ 6 ] 谢震, 许可宝, 秦世耀, 等. 基于电压源型和电流源型双馈风电机组稳定性对比分析[J]. 电网技术,

- 2021, 45(5): 1724-1735.
- XIE ZH, XU K B, QIN SH Y, et al. Comparative analysis of doubly-fed wind turbine stability based on voltage source and current source [J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1724-1735.
- [ 7 ] 代林旺, 李少林, 秦世耀, 等. 含阻尼环节的电流源型风电虚拟同步发电机控制与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 20-27.
- DAI L W, LI SH L, QIN SH Y, et al. Control and analysis of current-source wind turbine virtual synchronous generator with damping coefficient [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 20-27.
- [ 8 ] WANG S, HU J, YUAN X. Virtual synchronous control for grid-connected DFIG-based wind turbines[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 932-944.
- [ 9 ] 周鹏, 张新燕, 邸强, 等. 基于虚拟同步机控制的双馈风电机组预同步并网策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 71-78.
- ZHOU P, ZHANG X Y, DI Q, et al. Pre-synchronous grid-connection strategy of DFIG-based wind turbine with virtual synchronous generator control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 71-78.
- [10] 邱彬, 胡善华, 苏小平, 等. 基于 SOC 特性边界条件下 VSG 在光伏发电中最优控制策略研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 33-40.
- QIU B, HU SH H, SU X P, et al. Research on optimal control strategy of VSG in photovoltaic generation based on SOC characteristic boundary condition[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(9): 33-40.
- [11] 吴晓月, 王冰, 陈玉全, 等. 基于线性标准型的双馈风力发电机组反步滑模控制研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(8): 64-69.
- WU X Y, WANG B, CHEN Y Q, et al. Research on backstepping sliding mode control of doubly fed wind turbine based on linear standard form [J]. Journal of Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(8): 64-69.
- [12] 李鹏瀚, 王子强, 王杰. 双馈风电场次同步控制相互作用的分数阶滑模抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 897-910.
- LI P H, WANG Z Q, WANG J. Sub-synchronous control interaction mitigation strategy based on fractional-order sliding mode control for DFIG-based wind farm [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 897-910.
- [13] 谢震, 牛立凡, 张兴, 等. 不平衡电网电压下双馈发电机多目标模型预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3917-3929.
- XIE ZH, NIU L F, ZHANG X, et al. Multi-objective model predictive control of double-fed induction generator under unbalanced grid voltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3917-3929.
- [14] 高俊, 张河山, 彭志远, 等. 基于状态转移约束的永磁同步电机模型预测控制策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 86-92.
- GAO J, ZHANG H SH, PENG ZH Y, et al. Model predictive control method of permanent magnet synchronous motor based on state transition constraint [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 86-92.
- [15] 李鹏瀚, 王杰, 吴飞. 双馈风电机组次同步控制相互作用的反馈线性化滑模变结构抑制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(17): 3661-3671.
- LI P H, WANG J, WU F. Sub-synchronous control interaction mitigation for DFIGs by sliding mode control strategy based on feedback linearization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(17): 3661-3671.
- [16] YAZDANIAN M, MEHRIZI-SANI A. Washout filter-based power sharing [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 967-968.
- [17] 程启明, 黄伟, 程尹曼, 等. 双级矩阵变换器驱动永磁同步电机的混合非线性控制系统[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 101-111.
- CHENG Q M, HUANG W, CHENG Y M, et al. Hybrid nonlinear control system of permanent magnet synchronous motor driven by two stage matrix converter [J]. Transactions of China Electro-Technical Society, 2017, 32(4): 101-111.
- [18] 刘亨铭, 江畅, 程启明, 等. 不平衡电网下基于无源控制的 MMC-UPQC 电能质量综合治理研究[J]. 高压技术, 2021, 47(4): 1344-1355.
- LIU H M, JIANG CH, CHENG Q M, et al. Research on integrated management of MMC-UPQC power quality based on passivity control under unbalanced grid [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1344-1355.
- [19] 谢震, 李梦杰, 张兴, 等. 基于下垂并网的双馈风力发电机谐波电压抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5228-5237.
- XIE ZH, LI M J, ZHANG X, et al. Harmonic-voltage suppress strategy of doubly-fed induction generators based on voltage source droop grid-connected output [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5228-5237.
- [20] WANG P, LU X, YANG X, et al. An improved

distributed secondary control method for DC microgrids with enhanced dynamic current sharing performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9): 6658-6673.

## 作者简介



**程启明**(通信作者), 1984 年于苏州大学获得学士学位, 1988 年于浙江大学获得硕士学位, 现为上海电力大学教授, 主要研究方向为新能源发电控制和电力电子控制。

E-mail: chengqiming@sina.com

**Cheng Qiming** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Suzhou University in 1984, M. Sc. degree from

Zhejiang University in 1988, respectively. Now he is a professor in Shanghai University of Electric Power. His main research interests include new energy generation control and power electronic control.



**沈章平**, 2020 年于上海电力大学获得学士学位, 现为上海电力大学硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电控制和电力电子控制。

**Shen Zhangping** received his B. Sc. degree from Shanghai University of Electric Power in 2020. Now he is a M. Sc. candidate in Shanghai University of Electric Power. His main research interests include new energy generation control and power electronic control.