

孤立电网中风电和储能的联合 非线性鲁棒控制

韩金龙, 杜正春, 江晗, 袁泉添

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为优化风储孤立电网的暂态特性以提升其在恶劣运行环境下的抗干扰能力, 提出了孤立电网中风电和储能的联合非线性鲁棒控制策略。基于状态反馈精确线性化及鲁棒 H_∞ 最优控制理论, 并综合考虑了系统建模时同步电机的转矩扰动、功率扰动、电压扰动等各种干扰因素, 首先通过构造微分同胚非线性坐标变换, 建立了风储孤立电网的精确线性化动态模型, 进而设计了风电和储能的联合鲁棒控制器; 所提控制策略可使风机实时地保持最优转速以输出最大风功率, 并通过风电与储能的联合控制使系统出力跟踪负荷变化, 实现了多目标控制。仿真验证表明, 提出的风电和储能的联合非线性鲁棒控制策略对外界风速及负荷的扰动具有很强的鲁棒性; 当外界风速突变或系统负荷突变时, 风储孤网在非线性鲁棒控制器作用下可以迅速且平滑地过渡至稳态, 有效避免了采用传统 PI 控制时调节过程中出现的超调及 2~3 次振荡, 能显著提升风储孤立电网的暂态特性。该研究为风储孤立电网的联合控制提供设计理论基础及工程实践。

关键词: 孤立电网; 储能; 精确线性化; 非线性鲁棒控制; 联合控制

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202309016 **文章编号:** 0253-987X(2023)09-0152-10

Combined Nonlinear Robust Control of Wind Power and Energy Storage in Isolated Grids

HAN Jinlong, DU Zhengchun, JIANG Han, YUAN Xiaotian

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to optimize the transient characteristics of the isolated wind-storage power grid and enhance its anti-interference ability in harsh operation, a combined nonlinear robust control strategy of wind power and energy storage in isolated grids was proposed in the paper. Based on the state feedback exact linearization and robust H_∞ optimal control theory and taking into consideration various interference factors (for instance, torque disturbance, power disturbance, voltage disturbance of the synchronous motor) in the system modeling, an exact linearization dynamic model of the isolated wind-storage grid was established by constructing the diffeomorphism nonlinear coordinate transformation, and then a combined nonlinear robust controller of wind power and energy storage was designed. The proposed strategy can help the wind turbine maximize the wind power by maintaining the optimal revolution speed in real time and can keep power generation tracking the load change through the combined control of wind power and energy storage,

realizing the multi-objective control. The simulation results show that the proposed combined nonlinear robust control strategy can hold strong robustness to external wind speed and load disturbance. When the external wind speed or the system load changes drastically, the isolated wind-storage grid can promptly and smoothly transition to the steady state under the action of the nonlinear robust controller, which effectively avoids the overshoot and 2—3 oscillations in the adjustment process when using the traditional PI control and significantly improves the transient characteristics of the isolated wind-storage grid. The research can provide a theoretical basis and engineering practice for the combined control of isolated wind-storage grids.

Keywords: isolated grid; energy storage; exact linearization; nonlinear robust control; combined control

为解决传统发电模式所引起的经济及环境问题,随着电力电子技术的快速发展,利用分布式能源的发电模式已逐渐成为世界各国的共识^[1-2]。然而,分布式能源的不稳定、随机波动等特点影响了其大规模开发和接入大电网;此外,风电机组需建于风力资源丰富的地区,这类地区多较为偏远(例如海岛),远离主电网。因此,就地组建微电网,利用地区的分布式能源进行孤网供电成为解决上述问题的有效途径之一^[3-6]。

孤立微电网中分布式能源的随机性、间歇性、不确定性以及负荷的随机波动给系统的稳定运行带来了严峻的考验^[7]。为削减发电侧与需求侧间的功率不匹配,促进可再生能源消纳,在孤立电网中应用储能技术已成为关键技术手段^[8-10]。储能系统的应用,补偿了分布式能源不稳定的出力,使得可再生能源发电机组能在更大出力范围内运行,成为推动新能源微电网技术广泛应用的重要措施^[11-13]。

近年来,基于储能系统的微电网控制策略已得到了广泛且深入的研究,其控制核心即为协调分布式电源和储能系统的出力以维持微电网稳定运行。文献[14]提出了一种光伏逆变器与储能系统的协调控制策略,利用储能系统输出功率的变化对光伏系统的输出功率进行调节,从而抑制了储能变流器暂态功率波动。文献[15]为实现100%绿色能源给全部负荷供电,深入探讨了海岛微电网群的优化配置,并提出了储能装置的运行成本优化策略。文献[16]对微电网中的混合储能系统提出了一种基于内模控制的平均电流控制策略。文献[17]围绕风光柴储孤立微电网制定了以提高系统全寿命周期经济性为目标的多能源的协调控制策略。文献[18]构建了针对微电网复合储能系统的深度强化学习方法,实时优化控制蓄电池及储氢装置的充放电状态。文献[19]针对高渗透率风电-储能孤立电网,提出了上层广域

功率平衡和下层储能 V/f 控制组成的联合控制策略,能够有效地维持孤网的电网电压及频率稳定。上述文献虽然对含储能的微网系统的运行控制提供了很好的理论参考价值,但所使用的模型大都没有考虑系统未精确建模部分等干扰因素对控制效果的不利影响,故难以保证微电网系统在大干扰下的稳定运行。

本文基于状态反馈精确线性化及鲁棒 H_∞ 最优控制理论,提出孤立电网中风电和储能的联合非线性鲁棒控制策略。首先简要介绍了风储孤立电网的运行原理,并归纳其各模块的数学模型;其次,通过构造微分同胚变换,建立了孤立电网的精确线性化模型,并综合考虑了各种干扰因素,以对风电和储能部分进行联合非线性鲁棒控制设计;最后,对该控制策略进行仿真验证,并与传统PI控制进行了对比分析。仿真结果表明,本文所提的风电和储能的联合非线性鲁棒控制对外界风速及负荷的扰动具有很强的鲁棒性,显著提高了孤立电网的抗扰特性。

1 风储孤立电网

1.1 孤网拓扑结构

本文所采用的风储孤立电网拓扑结构如图1所示。该电网主要由风电、电池储能系统(BESS)、永久负荷、可投切负荷及备用电源组成。其中:风电部分由风轮机、永磁同步发电机(PMSG)、全功率背靠背变换器、串联滤波器构成,负责系统的主要能源供给;电池储能系统由蓄电池、逆变器、电抗器构成,负责系统的功率调节;永久负荷即为用户侧的综合负荷,经变压器从公共耦合点(PCC)处汲取电能;备用电源及可投切负荷则为系统出现极端情况下的应急设备。

为充分利用地区风能资源,可通过控制机侧变换器(RSC)去调节PMSG定子电压,使其转子处于由风机特性决定的最优转速;风电出力与负荷需求

的功率差额则通过电池储能系统来补偿,此过程可通过控制蓄电池侧变换器(BSC)的电压来实现。该运行模式的优势在于风机总是处于最大风功率追踪(MPPT)状态,而不需要通过桨距角控制去限制风机的出力以跟踪负荷需求来实现系统功率平衡^[20],最大程度地发挥了风机的发电能力。

此外,为满足孤网中负荷对电能质量的要求,可使网侧变换器(GSC)输出频率和幅值都不受风速及负荷波动影响的交流电压。此电压为含有开关频率分量的 PWM 波,经过一个串联谐振于工频的滤波器后方可实现对 PCC 电压的直接控制,从而给负荷提供一个稳定可靠的工频交流电压。

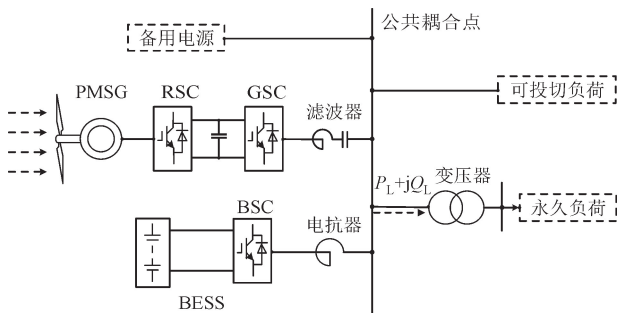


图 1 孤立电网拓扑结构图

Fig. 1 Topology of isolated grid system

在极端情况下,需投入备用电源和/或可投切负荷来保持系统的功率平衡。当发电功率大于负荷需求,且储能系统已充满能量时,需接入可投切负荷来消纳过剩的电功率;反之,当发电功率小于负荷需求,且储能系统已释放尽电能时,则需投入备用电源甚至切负荷来实现功率平衡。

本文所提的控制策略旨在实现孤立电网中发电功率与负荷功率差额在适当范围内的风电和储能联合非线性鲁棒控制。即不考虑投入备用电源和可投切负荷时的极端情况,BESS 总有能力吸收或发出电功率作为功率调节装置来保持系统平衡。

1.2 系统数学模型

当忽略铁心损耗时,永磁同步电机在 $d-q$ 旋转坐标系下(电机转子磁链定向于 d 轴)的动态方程如下^[21]

$$\begin{cases} L_s \frac{di_s^d}{dt} = -R_s i_s^d + L_s^q p \omega_r i_s^q + u_s^d \\ L_s \frac{di_s^q}{dt} = -R_s i_s^q - L_s^d p \omega_r i_s^d - \varphi_v p \omega_r + u_s^q \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_s^d 、 u_s^q 分别为定子机端电压的 d 、 q 轴分量; i_s^d 、

i_s^q 分别为定子电流的 d 、 q 轴分量(采用电动机惯例,即电流流入电机为其正方向); L_s^d 、 L_s^q 分别为定子电感的 d 、 q 轴分量; R_s 为定子电阻; φ_v 为永磁体的磁通; p 为极对数; ω_r 为转子机械角速度。

对于永磁直驱风机,其转子和风机以相同转速旋转,可视为单质量块,则运动方程可以表示为

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e - B\omega_r \quad (2)$$

式中: J 为风力机及发电机转子整体的机械转动惯量; B 为阻尼系数; T_m 为气动转矩; T_e 为电磁转矩,其正方向与转子转向相反,可以表示为^[21]

$$T_e = -1.5p(\varphi_v + (L_s^d - L_s^q)i_s^d)i_s^q \quad (3)$$

对于隐极同步机,有

$$L_s^d = L_s^q = L_s \quad (4)$$

此时,永磁同步电机 PMSG 输出的电功率 $P_s + jQ_s$ 可以表示为

$$\begin{cases} P_s = -1.5(u_s^d i_s^d + u_s^q i_s^q) \\ Q_s = -1.5(u_s^q i_s^d - u_s^d i_s^q) \end{cases} \quad (5)$$

全功率变换器依靠大电容维持其直流电压,该直流环节电压的动态方程可表述为

$$CU_C \frac{dU_C}{dt} = P_s - P_L + P_B \quad (6)$$

式中: C 为直流环节的电容值; U_C 为直流电压; P_s 为永磁同步电机的输出功率; P_L 为负荷功率; P_B 为电池储能系统输出的补偿功率。

蓄电池作为电力系统中应用最广泛且最成熟的储能技术,已成为高渗透率新能源电力系统中维持功率平衡的重要单元^[19]。通过检测 PCC 电压 u_g , 并将其定向于 $d-q$ 旋转坐标系的 d 轴,即 $u_g^d = u_g$, $u_g^q = 0$,则电池储能系统的电压动态方程可表示如下^[22]

$$\begin{cases} L_B \frac{di_B^d}{dt} = -R_B i_B^d + \omega L_B i_B^q - u_g^d + u_B^d \\ L_B \frac{di_B^q}{dt} = -R_B i_B^q - \omega L_B i_B^d + u_B^q \end{cases} \quad (7)$$

式中: u_B^d 、 u_B^q 分别为变换器 BSC 输出电压 u_B 的 d 、 q 轴分量; i_B^d 、 i_B^q 分别为变换器 BSC 输出电流的 d 、 q 轴分量; R_B 、 L_B 分别为电抗器 L 的电阻及电感; ω 为电网的同步角速度。

此时,电池储能系统输出的电功率 $P_B + jQ_B$ 可表示为

$$\begin{cases} P_B = 1.5u_g i_B^d \\ Q_B = -1.5u_g i_B^q \end{cases} \quad (8)$$

2 非线性鲁棒控制策略

2.1 基本理论

实际工程中外界干扰、量测误差、参数误差以及被控对象的未建模动态等各种不确定性往往会严重影响控制系统的控制效果^[23]。本节将简要介绍一种结合了状态反馈精确线性化和线性鲁棒控制理论的非线性鲁棒控制设计方法。该控制方法可以改善系统的鲁棒性能,从而降低干扰对控制系统的不利影响。

考虑具有如下形式的仿射非线性系统

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_1(\mathbf{x})\mathbf{w} + \mathbf{g}_2(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ 、 $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ 、 $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^p$ 和 $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^s$ 分别为状态向量、控制向量、干扰向量和输出向量; $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{g}_1(\mathbf{x})$ 、 $\mathbf{g}_2(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 是光滑的向量函数。

根据微分几何控制方法中的状态反馈精确线性化理论,当从控制 $\mathbf{u}$ 到输出 $\mathbf{y}$ 的关系度 ρ 等于系统维度 n 时,可构造相应的微分同胚变换及非线性预反馈

$$\begin{cases} \mathbf{z} = \mathbf{T}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{v} = \boldsymbol{\alpha}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\beta}(\mathbf{x})\mathbf{u} \end{cases} \quad (10)$$

可使得式(9)转换为线性系统^[24]

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}_1\bar{\mathbf{w}} + \mathbf{B}_2\mathbf{v} \\ \mathbf{y}_z = \mathbf{C}\mathbf{z} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\bar{\mathbf{w}} = \frac{\partial \mathbf{T}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}_1(\mathbf{x})\mathbf{w}$; $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}_1$ 、 $\mathbf{B}_2$ 、 $\mathbf{C}$ 为相应维度的系数矩阵。

根据线性 H_∞ 控制理论,式(11)的鲁棒问题有如下最优控制策略^[25]

$$\mathbf{v}^* = -\mathbf{B}_2^T \mathbf{P}^* \mathbf{z} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{P}^*$ 为满足 Riccati 方程的半正定解。Riccati 方程为

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} + \frac{1}{\gamma^2} \mathbf{P} \mathbf{B}_1 \mathbf{B}_1^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{B}_2 \mathbf{B}_2^T \mathbf{P} + \mathbf{C}_1^T \mathbf{C}_1 = 0 \quad (13)$$

式中: γ 为衡量系统鲁棒性能的正系数。

在控制律式(12)的作用下,式(11)对干扰 $\bar{\mathbf{w}}$ 的响应会满足下述不等式

$$\int_0^\infty (\|\mathbf{y}_z(t)\|^2 + \|\mathbf{v}(t)\|^2) dt \leq \gamma^2 \int_0^\infty (\|\bar{\mathbf{w}}(t)\|^2) dt \quad (14)$$

将式(10)代入式(12)(14)可知,对非线性系统式(9)而言,为满足下式所表述的鲁棒性能

$$\int_0^\infty (\|\mathbf{y}(t)\|^2 + \|\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\beta}(\mathbf{x})\mathbf{u}\|^2) dt \leq \gamma^2 \int_0^\infty (\|\frac{\partial \mathbf{T}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}_1(\mathbf{x})\mathbf{w}\|^2) dt \quad (15)$$

存在最优鲁棒控制律 $\mathbf{u}^*$

$$\mathbf{u}^* = -\boldsymbol{\beta}^{-1}(\mathbf{x})[\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}_2^T \mathbf{P}^* \mathbf{T}(\mathbf{x})] \quad (16)$$

2.2 风电和储能的联合鲁棒控制器设计

联立式(1)、(2)、(6)、(7)可知,如图1所示的风储孤网为四输入六阶非线性动态系统。为便于精确线性化,现结合式(1)、(3)~(5),将式(6)等效变换如下

$$\begin{cases} \frac{dW}{dt} = \omega_r T_e - P_L + P_B - 1.5R_s(i_s^{d2} + i_s^{q2}) \\ W = W_C + W_{L_s} = 0.5CU_C^2 + 0.5 \times 1.5L_s(i_s^{d2} + i_s^{q2}) \end{cases} \quad (17)$$

式中: W_C 表示直流环节的电容中所存储的电场能量; W_{L_s} 表示同步电机定子绕组的电感中所存储的磁场能量; W 则表示惯性环节的总存储场能量。

对该孤立电网选取状态变量及输入控制量

$$\begin{cases} [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6] = [\omega_r, W, i_s^d, i_s^q, i_B^d, i_B^q] \\ [u_1, u_2, u_3, u_4] = [u_s^d, u_s^q, u_B^d, u_B^q] \end{cases} \quad (18)$$

联立式(1)~(7),并考虑系统未精确建模等所带来的干扰因素,整个系统动态方程可表述为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (T_m - Bx_1 + 1.5p\varphi_v x_4)/J \\ 1.5u_g x_5 - P_L - 1.5R_s(x_3^2 + x_4^2) - 1.5px_1\varphi_v x_4 \\ -R_s x_3/L_s + px_1 x_4 \\ -R_s x_4/L_s - px_1 x_3 - px_1\varphi_v/L_s \\ -R_B x_5/L_B + \omega x_6 - u_g/L_B \\ -R_B x_6/L_B - \omega x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_1/L_s \\ u_2/L_s \\ u_3/L_B \\ u_4/L_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1/J \\ w_2 \\ w_3/L_s \\ w_4/L_s \\ w_5/L_B \\ w_6/L_B \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: w_1 表征了同步电机转轴上的转矩扰动; w_2 表征了流经背靠背变换器的功率扰动; w_3 、 w_4 表征了同步电机定子回路中的电压扰动; w_5 、 w_6 表征了电池储能系统中电抗器上的电压扰动。

本控制系统期望实现的控制目标如下:

(1) 调节同步电机转速 ω_r 至最优值 ω_r^* , 从而最大程度地捕获风能;

(2) 维持直流环节电压 U_C (该电气量可以通过 W 间接反映) 为设定值 U_C^* , 以维持逆变器的正常工作;

(3) 抑制定子电流 d 轴分量 i_s^d 为 0 以降低同步电机输出的无功功率 Q_s 从而降低损耗;

(4) 保持电池储能系统输出的无功功率 Q_B (此电气量可以通过 i_B^q 间接反映) 对无功负荷 Q_L 的跟踪, 以实现风电部分的单位功率因数运行, 充分利用各电力器件容量。

基于该控制目标, 对式(19)构造罚函数输出

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - \omega_r^* \\ x_2 - W^* \\ x_3 \\ x_6 - i_B^{q*} \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: ω_r^* 、 W^* 、 i_B^{q*} 为相应的稳态值, 根据式(2)、(3)和(17)可推导出各稳态值的表达式如下

$$\begin{cases} \omega_r^* = v_{\text{wind}} \lambda_{\text{opt}} / R \\ W^* = 0.5C(U_C^*)^2 + 0.75L_s(i_s^{q*})^2 \\ i_s^{q*} = \frac{2}{3} \frac{B\omega_r^* - T_m}{p\varphi_v} \\ i_B^{q*} = -\frac{2Q_L}{3u_g} \end{cases} \quad (21)$$

式中: R 为风轮机半径; λ_{opt} 为风机最佳叶尖速比; v_{wind} 为风速。

为将非线性系统式(19)精确线性化, 现构造如下微分同胚坐标变换

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \bar{w}_1 \\ \bar{w}_2 \\ \bar{w}_3 \\ \bar{w}_4 \\ \bar{w}_5 \\ \bar{w}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1.5p\varphi_v/J & 0 & 0 \\ -1.5p\varphi_v x_4 & 0 & -3R_s x_3 & -3R_s x_4 - 1.5p x_1 \varphi_v & 1.5u_g & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1/J \\ w_2 \\ w_3/L_s \\ w_4/L_s \\ w_5/L_B \\ w_6/L_B \end{bmatrix} \quad (25)$$

由风储孤网的精确线性化模型式(11)可知, 其系数矩阵为

$$\begin{bmatrix} x_1 - \omega_r^* \\ x_2 - W^* \\ x_3 \\ x_6 - i_B^{q*} \\ [T_m - Bx_1 + 1.5p\varphi_v x_4]/J \\ 1.5u_g x_5 - P_L - 1.5R_s(x_3^2 + x_4^2) - 1.5p x_1 \varphi_v x_4 \end{bmatrix} \quad (22)$$

则式(19)在状态空间 z 下的动态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \\ \dot{z}_5 \\ \dot{z}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_5 \\ z_6 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{w}_1 \\ \bar{w}_2 \\ \bar{w}_3 \\ \bar{w}_4 \\ \bar{w}_5 \\ \bar{w}_6 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中: v_i ($i=1, 2, 3, 4$) 为控制量; $\bar{w}_j$ ($j=1, 2, \dots, 6$) 为干扰量。根据前述微分几何精确线性化相关理论, v_i 、 $\bar{w}_j$ 与系统式(19)相应量存在如下的对应关系

$$\begin{cases} v_1 = -\frac{R_s}{L_s} x_3 + p x_1 x_4 + \frac{1}{L_s} u_1 \\ v_2 = -\frac{R_B}{L_B} x_6 - \omega x_5 + \frac{1}{L_B} u_4 \\ v_3 = -\frac{B}{J} \frac{1}{J} [T_m - Bx_1 + \frac{3}{2} p\varphi_v x_4] + \frac{3p}{2J} \varphi_v [-\frac{R_s}{L_s} x_4 - p x_1 x_3 - p x_1 \frac{\varphi_v}{L_s} + \frac{1}{L_s} u_2] \\ v_4 = \frac{3}{2} u_g (-\frac{R_B}{L_B} x_5 + \omega x_6 - \frac{1}{L_B} u_g + \frac{1}{L_B} u_3) - \frac{3}{2} p\varphi_v x_4 \frac{1}{J} [T_m - Bx_1 + \frac{3}{2} p\varphi_v x_4] - (\frac{3}{2} p x_1 \varphi_v + 3R_s x_4) \frac{2J}{3p\varphi_v} (v_3 + \frac{B}{J^2} [T_m - Bx_1 + \frac{3}{2} p\varphi_v x_4]) - 3R_s x_3 v_1 \end{cases} \quad (24)$$

(24)

(25)

$$\left\{ \begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (26)$$

由不等式(14)及(15)可知, γ 越小则系统的鲁棒性能越强。为充分抑制干扰 $w_j (j=1,2,\cdots,6)$ 对系统的影响, 故选取 $\gamma=2$ 。将该 γ 及式(26)中的各

系数阵代入 Riccati 方程式(13)中, 并将其解 $\mathbf{P}^*$ 代入式(12), 可得最优控制律 $\mathbf{v}^*$ 为

$$\begin{bmatrix} v_1^* \\ v_2^* \\ v_3^* \\ v_4^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.1547z_3 \\ -1.1547z_4 \\ -1.6233z_1 - 2.2819z_5 \\ -1.6233z_2 - 2.2819z_6 \end{bmatrix} \quad (27)$$

根据式(24)所描述的孤立电网的直接控制量 $u_i (i=1,2,3,4)$ 与其精确线性化模型的间接控制量 $v_i (i=1,2,3,4)$ 之间的关系, 可以得到原非线性系统关于 u_i 的鲁棒最优控制律为

$$\left\{ \begin{aligned} u_1^* &= L_s v_1^* + R_s x_3 - p L_s x_1 x_4 \\ u_2^* &= \frac{2JL_s}{3p\varphi_v} (v_3^* + \frac{B}{J^2} [T_m - Bx_1 + \frac{3}{2} p\varphi_v x_4]) + R_s x_4 + p L_s x_1 x_3 + p x_1 \varphi_v \\ u_3^* &= R_B x_5 - \omega L_B x_6 + u_g + \frac{2L_B}{3u_g} \{ v_4^* + 3R_s x_3 v_1^* + \frac{3}{2} p\varphi_v x_4 \frac{1}{J} [T_m - Bx_1 + \frac{3}{2} p\varphi_v x_4] + (\frac{3}{2} p x_1 \varphi_v + 3R_s x_4) \frac{2J}{3p\varphi_v} \cdot (v_3^* + \frac{B}{J^2} [T_m - Bx_1 + \frac{3}{2} p\varphi_v x_4]) \} \\ u_4^* &= L_B v_2^* + R_B x_6 + L_B \omega x_5 \end{aligned} \right. \quad (28)$$

综上所述, 孤立电网中风电和储能的联合非线性鲁棒控制框图如图 2 所示。

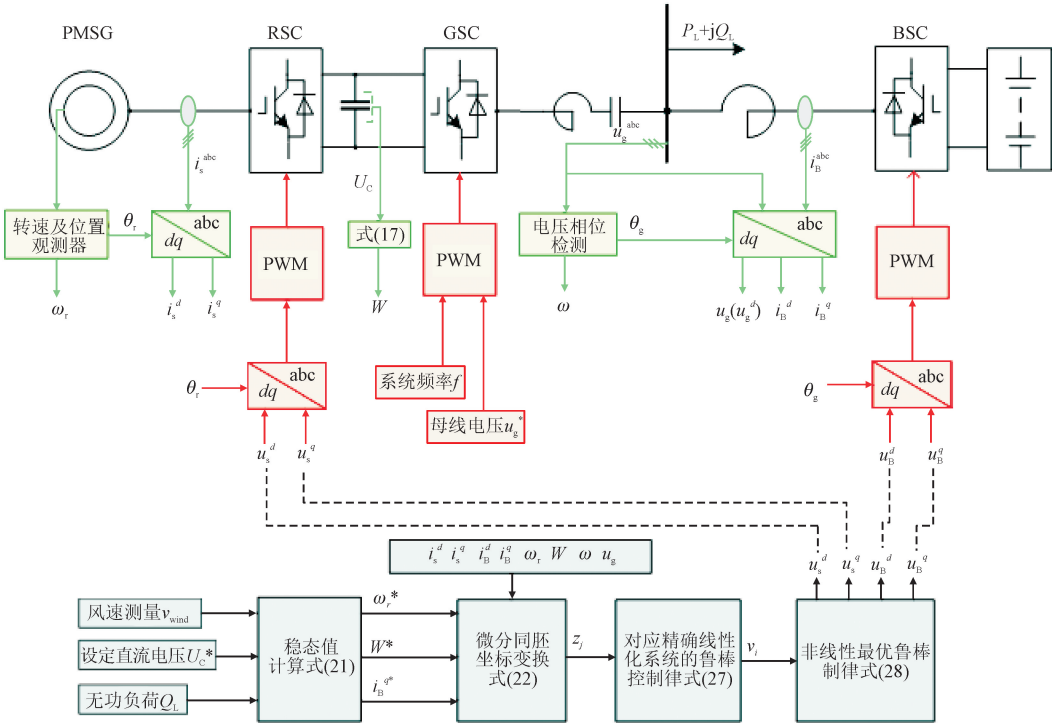


图 2 风电和储能的联合非线性鲁棒控制框图

Fig. 2 Combined nonlinear robust control block of wind power and energy storage

3 仿真验证

为验证本文所提出的孤立电网中风电和储能的联合非线性鲁棒控制所带来的效益,本节对其进行仿真验证,并与传统的基于 PI 调节的控制策略(根据控制系统的频率响应特性并结合时域仿真测试最终确定其 PI 控制参数如下:机侧换流器 RSC 电流内环的积分系数为 1,比例系数为 1;电池储能系统 BESS 电流环的积分系数为 8,比例系数为 5。)进行对比分析。风储孤立电网的拓扑结构亦如图 1 所示,其主要参数设置见表 1 所示,其中电池储能系统 BESS 采用容量为 1 MW/3 MW·h 的全钒液流电池系统。

表 1 孤立电网主要仿真参数

Table 1 Main parameters of isolated grid

仿真参数	数值
PMSG 定子电阻 $R_s/\text{m}\Omega$	3
PMSG 定子电感 L_s/mH	2
PMSG 永磁磁通 φ_v/Wb	20
PMSG 极对数 p	2
PMSG 额定功率/MW	1.5
额定风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	15
直流环节电容 C/mF	50
电抗器电阻值 $R_B/\text{m}\Omega$	1.2
电抗器电感值 L_B/mH	0.5
BESS 额定功率/MW	1
BESS 额定容量/MW	3
直流环节电压设定值 U_c^*/V	1 500
系统频率 f/Hz	50

3.1 风速突变场景

为检测恶劣风况下的该风储孤网的抗干扰能力,令外界风速在 $t=2\text{ s}$ 时由 15 m/s 突降至 12 m/s ,在 $t=8\text{ s}$ 时由 12 m/s 再突增至 18 m/s 。风速突变场景下风储孤网的动态响应如图 3 所示。

在非线性鲁棒控制器作用下,根据图 3(b)、(c)可知,风机转子电角速度能保持对外界风速的跟踪,快速且平稳的调节到由 MPPT 决定的最优值,实现风功率的最大捕获。根据图 3(d),电池储能系统能在风速突降(突增)时增大(减小)其输出功率,以补偿风力发电与负荷消耗间的不平衡功率。根据图 3(e),直流环节电压在经受小幅波动后能迅速稳定于设定值。结合图 3 各子图可知,当外界风速突

增或突降时,本文所提的非线性鲁棒控制策略通过联合控制各变换器的电压输出,可以使孤立电网快速稳定于新的平衡状态。相较于传统的基于 PI 调节的控制策略,有效避免了动态调节过程中的超调及振荡现象(以电池储能系统输出功率 P_B 为例,其动态响应的超调量为 60.3% 、且经历了 2 次振荡,如图 3(d)所示。),对外界风速的突变展现出了较强的鲁棒性。

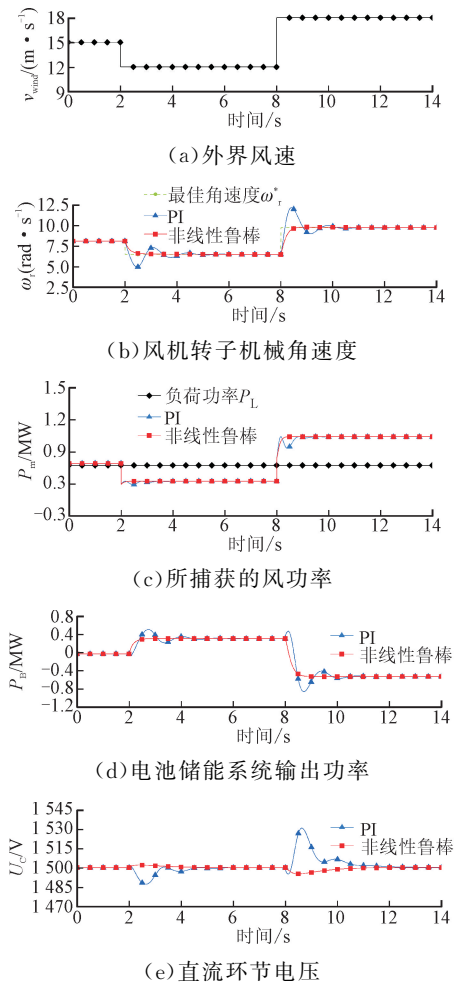


图 3 风速突变时两种控制策略孤立电网动态响应的比较
Fig. 3 Dynamic response of isolated grid under two control strategies while wind speed changes suddenly

3.2 负荷突变场景

对于孤立电网,由于没有大电网的电压支撑,其状态量对负荷的波动一般较为敏感,因而孤立电网需要具备一定的抗负荷扰动能力。令负荷功率在 $t=2\text{ s}$ 时由 $(0.68 + \text{j}0.10)\text{ MW}$ 突增至 $(0.70 + \text{j}0.12)\text{ MW}$,在 $t=8\text{ s}$ 时由 $(0.70 + \text{j}0.12)\text{ MW}$ 突降至 $(0.67 + \text{j}0.085)\text{ MW}$ 。负荷突变场景下风储孤网的动态响应如图 4 所示。

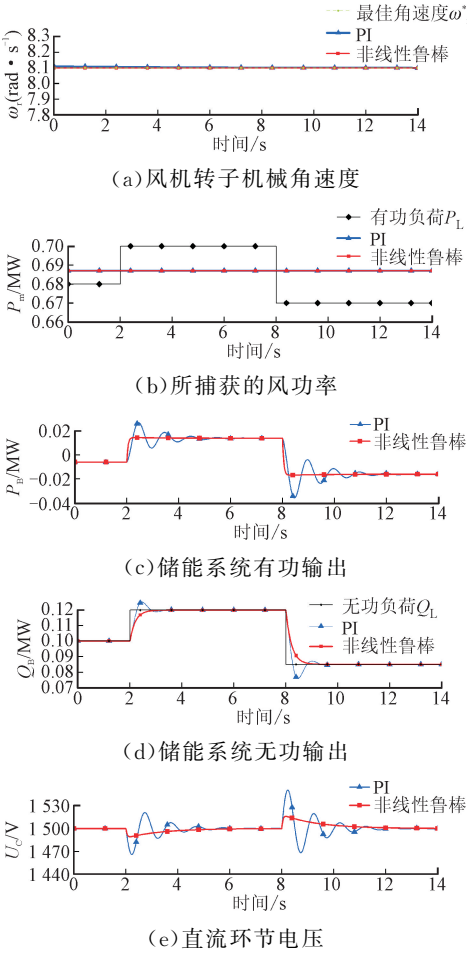


图 4 负荷突变时两种控制策略下孤立电网动态响应的比较
Fig. 4 Dynamic response of isolated grid under two control strategies while load changes abruptly

在非线性鲁棒控制器作用下,由图 4(a)可知,负荷变化不会影响风力机的转子转速,因为风机转速仅取决于外界风速。由图 4(b)、(c)可知,当有功负荷突增(突降)时,电池储能系统可以立即响应负荷变化,相应地增加(减少)其输出功率以维持系统功率平衡;由图 4(d)可知,本文控制策略实现了对电池储能系统有功、无功输出功率的解耦控制,在维持系统有功功率平衡的同时还保持着对无功负荷的跟踪。根据图 4(e),直流环节电压在经受小幅冲击后能迅速回归于设定值。结合图 4 各子图可知,本文所提的非线性鲁棒控制策略可以综合协调控制 PMSG 和 BESS 中各变换器的输出电压,使孤立电网在负荷突变时具有良好的动态响应,相较于传统的基于 PI 调节的控制策略,其过度过程更加平稳光滑,有效避免了 PI 动态调节过程中的超调及振荡现象(以电池储能系统输出功率 P_B 为例,其动态响应的超调量为 64.4%、且需经历 3 次振荡,如图 4(c)

所示),展示出优良的抗负荷扰动性能。

3.3 随机风速、随机负荷场景

实际工程中,外界风速及负荷功率都在随机波动。为检测本文所提的非线性鲁棒控制策略在随机风速、随机负荷场景下的运行特性,令外界风速、负荷功率在时段 $t \in (2, 12)$ s 内分别于 15 m/s、0.72 MW 附近随机波动。随机风速、随机负荷场景下风储孤网的动态响应如图 5 所示。

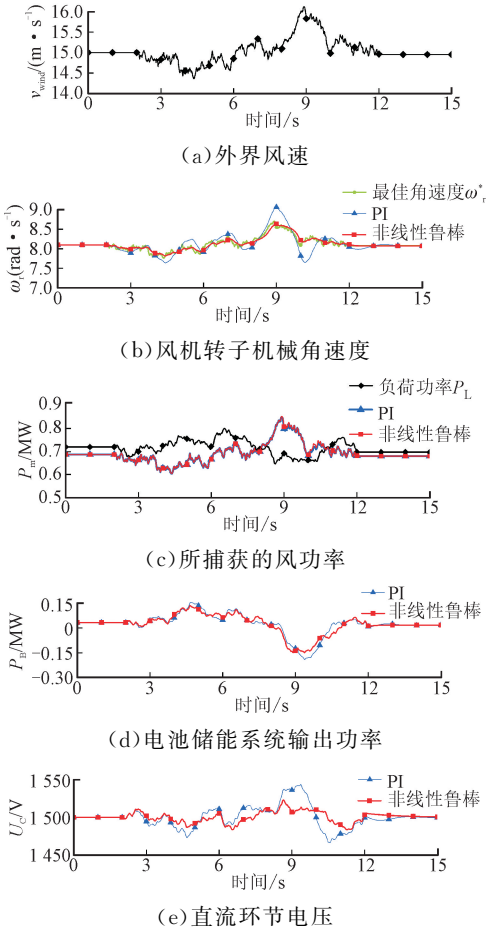


图 5 风速及负荷均随机变化时两种控制策略下孤立电网动态响应的比较
Fig. 5 Dynamic response of isolated grid under two control strategies while wind speed and load change randomly

在非线性鲁棒控制器作用下,由图 5(b)可知,风机转子电角速度能及时响应风速变化;由图 5(c)可知,风机所捕获的风功率和负荷功率都在独立地随机波动,且总是存在较大差额;由图 5(d)可知,电池储能系统能很好地补偿图 5(c)中的功率差额,以满足孤立电网电力的供求关系;结合图 5(b)、(e)可知,相较于传统的基于 PI 调节的控制策略,风机转速、直流电压波动幅值更小、变化更加平缓,对风速及负荷的随机波动具有更强的鲁棒性。

纵观图3~图5,本文所提的非线性鲁棒控制策略可以在各种恶劣场景下维持风电孤网的稳定运行。通过对PMSG和BESS中各个变换器进行联合控制,使系统快速适应外界风速的波动和负荷需求的变化,有效的避免了传统基于PI调节的控制模式中常见的超调及振荡现象,使孤立电网能更平缓地度过其受扰后的动态恢复过程。

4 结 论

本文基于状态反馈精确线性化及鲁棒 H_∞ 最优控制理论,提出了孤立电网中风电和储能的联合非线性鲁棒控制策略,使风机实时地保持最优转速以输出最大风功率,并通过风电与储能的联合控制使系统出力跟踪负荷变化,实现多目标控制。本文所提的风电和储能的联合非线性鲁棒控制策略对外界风速及负荷的扰动具有很强的鲁棒性,有效避免了采用传统PI控制时调节过程中出现的超调及振荡,显著提高了孤网的抗扰特性。

参考文献:

- [1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107.
- [2] 别朝红,林雁翎. “微网规划与设计”国际标准研究[J]. 标准科学, 2017(12): 172-177.
BIE Chaohong, LIN Yanling. Research on international standards for microgrid planning and design [J]. Standard Science, 2017(12): 172-177.
- [3] DE SOUZA RIBEIRO L A, SAAVEDRA O R, DE LIMA S L, et al. Isolated micro-grids with renewable hybrid generation: the case of Lençóis island [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(1): 1-11.
- [4] 王成山,王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4, 31.
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4, 31.
- [5] KANELLOS F D, HATZIARGYRIOU N D. Optimal control of variable speed wind turbines in islanded mode of operation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(4): 1142-1151.
- [6] 马溪原,吴耀文,方华亮,等. 采用改进细菌觅食算

法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 17-25.

MA Xiyuan, WU Yaowen, FANG Hualiang, et al. Optimal sizing of hybrid solar-wind distributed generation in an islanded microgrid using improved bacterial foraging algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 17-25.

- [7] VRETTOS E I, PAPATHANASSIOU S A. Operating policy and optimal sizing of a high penetration RES-BESS system for small isolated grids [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(3): 744-756.
- [8] 石庆均,耿光超,江全元. 独立运行模式下的微网实时能量优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 26-35.
SHI Qingjun, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch of standalone microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 26-35.
- [9] KIM J Y, JEON J H, KIM S K, et al. Cooperative control strategy of energy storage system and micro-sources for stabilizing the microgrid during islanded operation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3037-3048.
- [10] 彭思敏,王晗,蔡旭,等. 含双馈感应发电机及并联型储能系统的孤网运行控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 23-28.
PENG Simin, WANG Han, CAI Xu, et al. An operation control strategy for islanded power systems with DFIG and parallel-connected battery energy storage system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 23-28.
- [11] 赵波,张雪松,李鹏,等. 储能系统在东福山岛独立型微电网中的优化设计和应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 161-167.
ZHAO Bo, ZHANG Xuesong, LI Peng, et al. Optimal design and application of energy storage system in Dongfushan island stand-alone microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 161-167.
- [12] 赵波,包侃侃,徐志成,等. 考虑需求侧响应的光储并网型微电网优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5465-5474.
ZHAO Bo, BAO Kankan, XU Zhicheng, et al. Optimal sizing for grid-connected PV-and-storage microgrid considering demand response [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5465-5474.
- [13] 刘畅,卓建坤,赵东明,等. 利用储能系统实现可再

- 生能源微电网灵活安全运行的研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18.
- LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18.
- [14] 张春雪, 黎灿兵, 冯伟, 等. 孤立运行光/储微电网中储能变流器暂态功率波动协调抑制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2302-2314.
- ZHANG Chunxue, LI Canbing, FENG Wei, et al. A coordinated transient power fluctuation suppression strategy for power conversion system in islanded PV/storage microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2302-2314.
- [15] 赵波, 李得民, 吴在军, 等. 基于 100% 绿色能源供电目标的海岛微电网群容量优化配置 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 932-945.
- ZHAO Bo, LI Demin, WU Zaijun, et al. Capacity optimal sizing of island microgrid clusters based on the target of 100% green energy power supply [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 932-945.
- [16] LATORRE A, MARTINEZ W, CORTES C A. Average current control with internal model control and real-time frequency decoupling for hybrid energy storage systems in microgrids [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(2): 511-522.
- [17] 刘梦璇, 郭力, 王成山, 等. 风光柴储孤立微电网系统协调运行控制策略设计 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 19-24.
- LIU Mengxuan, GUO Li, WANG Chengshan, et al. A coordinated operating control strategy for hybrid isolated microgrid including wind power, photovoltaic system, diesel generator, and battery storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 19-24.
- [18] 张自东, 邱才明, 张东霞, 等. 基于深度强化学习的微电网复合储能协调控制方法 [J]. 电网技术, 2019, 43(6): 1914-1921.
- ZHANG Zidong, QIU Caiming, ZHANG Dongxia, et al. A coordinated control method for hybrid energy storage system in microgrid based on deep reinforcement learning [J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 1914-1921.
- [19] 施琳, 罗毅, 施念, 等. 高渗透率风电-储能孤立电网控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 78-85.
- SHI Lin, LUO Yi, SHI Nian, et al. A control strategy of isolated grid with high penetration of wind and energy storage systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 78-85.
- [20] YUAN Xiaotian, DU Zhengchun, LI Yujun, et al. Control strategies for permanent magnet synchronous generator-based wind turbine with independent grid-forming capability in stand-alone operation mode [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021, 31(11): e13117.
- [21] ERROUSSI R, AL-DURRA A. A novel PI-type sliding surface for PMSG-based wind turbine with improved transient performance [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 834-844.
- [22] 金一丁, 宋强, 刘文华. 电池储能系统的非线性控制器 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 75-80.
- JIN Yiding, SONG Qiang, LIU Wenhua. Nonlinear controller for battery energy storage system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 75-80.
- [23] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2008: 68-70.
- [24] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2008: 126-131.
- [25] 关天祺, 梅生伟, 卢强, 等. 超导储能装置的非线性鲁棒控制器设计 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(17): 1-6.
- GUAN Tianqi, MEI Shengwei, LU Qiang, et al. Nonlinear robust control design for power system including superconducting magnetic energy storage devices [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(17): 1-6.

(编辑 杜秀杰)