

永磁直驱风电系统网侧换流器 混合控制策略研究

李晖¹, 王丹², 李庚银¹, 刘崇茹¹, 张宁³

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 102206; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京市 102209; 3. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 100084)

摘要: 针对永磁直驱风电系统网侧换流器模型存在非线性和强耦合的特点, 提出了一种非光滑控制和反推控制相结合的混合控制策略。在 dq 两相同步旋转坐标系下建立网侧换流器非线性数学模型, 采用非光滑控制理论和反推控制方法分别设计了外环直流电压控制策略和内环电流控制策略。在外环控制方面, 通过结合非光滑理论的有限时间控制方法和扩张状态观测器(extended state observer, ESO) 对于系统扰动的估计作用, 设计了直流电压控制器。在内环控制方面, 采用附加扰动补偿的反推控制方法进行设计, 利用扩张状态观测器对外部扰动造成的系统内环不确定因素进行估计, 将估计量引入到反推迭代控制律的设计中进行补偿, 通过选择合适的 Lyapunov 函数, 推导出内环电流反推控制律, 使内环系统满足 Lyapunov 渐近稳定条件。仿真结果表明, 与常规的 PI 线性控制策略相比, 所提混合控制策略能够有效提高永磁直驱风电系统在电网扰动时的并网动态特性。

关键词: 永磁直驱风电系统; 网侧换流器; 混合控制策略; 非光滑控制; 反推控制; 扩张状态观测器(ESO)

Compound Control Strategy for Grid-Side Converter of PMSG-Based Wind Power Generation System

LI Hui¹, WANG Dan², LI Gengyin¹, LIU Chongru¹, ZHANG Ning³

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China; 3. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Beijing 100084, China)

ABSTRACT: According to the nonlinear and strong coupling characters of the grid-side converter model of direct-driven permanent magnet synchronous generator (PMSG) based wind power generation system, this paper proposes a compound control strategy which combines the non-smooth control and back-stepping control. Based on the nonlinear mathematical model of the grid-side converter in dq synchronous rotating coordinate system, the grid-side outer-loop of DC voltage control strategy is designed by using non-smooth control principle and the inner-loop of current control scheme is designed by using back-stepping control method. In the aspect of outer-loop control, the DC voltage controller is designed by combining the finite-time feedback control method of non-smooth principle and the system disturbance estimation effect of extended state observer (ESO). The back-stepping control approach with additional disturbance compensation is applied in the inner-loop current control. By adopting ESO to estimate the uncertainties of system inner-loop caused by external disturbances, the back-stepping iterative control law is designed with the introduction of the estimated uncertainties for compensation. The appropriate Lyapunov function is established to obtain the principle of the inner-loop back-stepping current control, which makes the inner-loop system meet the Lyapunov asymptotic stability condition. The simulation results show that, compared with the conventional PI linear control strategy, the presented compound control strategy can effectively improve the grid-integration dynamic response performance of PMSG-based wind power generation system under the grid disturbance conditions.

KEYWORDS: direct-driven permanent magnet synchronous generator based wind power generation system; grid-side converter; compound control strategy; non-smooth control; back-stepping control; extended state observer(ESO)

中图分类号: TM 614

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2017)06-0133-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2017.06.018

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900101)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFB0900101)

0 引言

随着化石能源过度消耗和环境污染问题的日益严重,可再生能源的开发利用受到越来越多国家的重视^[1]。风力发电是近些年发展速度最快、技术最成熟的可再生能源发电技术,是缓解环保压力、破解能源困局、推动能源生产与消费革命的重要组成部分^[2]。中国风能资源十分丰富,是风电装机容量最大的国家^[3]。

双馈型和永磁直驱型风力发电机是市场上主流的2类风电机组。与双馈型风力发电机相比,永磁直驱型风力发电机(direct-driven permanent magnet synchronous generator, PMSG)由于省去了齿轮箱,节省了维护成本,减少了机械损耗,且具备更高的运行可靠性,具有明显的技术和成本优势^[4-6]。

PMSG通过背靠背双脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)全功率换流器并网,换流器在永磁直驱风电系统中起到解耦和电能变换的作用,是风机并网的核心部分^[7]。永磁直驱风电系统的运行性能取决于换流器控制策略,包括机侧和网侧换流器的控制策略。机侧换流器与PMSG相连,主要实现对发电机有功功率和无功功率的解耦控制,并追踪最大风能;网侧换流器是PMSG与电网的接口,主要作用是稳定直流侧电压,调节永磁直驱风电系统并网的无功功率,其控制策略直接影响并网性能。

在永磁直驱风电系统网侧换流器的设计中,常规双闭环PI控制结构简单,物理意义清晰,但存在动态响应特性差、对模型依赖性强等问题^[8-10]。近年来,国内外学者基于比例谐振控制^[10-12]、无差拍控制^[13-14]等方法对PMSG网侧换流器的改进控制策略进行研究,同时考虑到网侧换流器模型的非线性特性,还基于反馈线性化^[15-16]、变结构控制^[17-19]等方法设计了非线性

控制策略,但反馈线性化方法中的解耦矩阵可能存在奇异性的问题,变结构控制的开关属性会带来高频抖振,可能导致系统不稳定。由于大多数非线性控制策略都是基于准确的系统模型和确定的参数进行设计,并未考虑系统扰动、不确定扰动量会导致控制器性能下降的问题,因此有必要研究系统受扰情况下,永磁直驱风电系统网侧换流器的控制策略。

随着现代控制技术的发展,非光滑有限时间控制在提高系统收敛性和鲁棒性等方面具有一定优势,是介于光滑控制和非连续控制之间的一种非线性控制方法^[20]。此外,反推控制^[21]基于Lyapunov稳定理论,通过对子系统设计Lyapunov函数和虚拟控制量,能够实现系统的全局稳定,有效改善系统动态性能^[22]。扩张状态观测器(extended state observer, ESO)^[23]是自抗扰控制技术的核心部分,可有效估计系统扰动,并通过补偿控制提高系统的抗扰动能力。

本文针对电网扰动情况,提出一种直驱风电系统网侧换流器的混合控制策略。首先概述直驱风电系统基本结构和网侧换流器模型。其次基于非光滑控制理论,并结合ESO对直流电压模型中不确定扰动量的估计,设计考虑扰动补偿的外环非光滑有限时间控制策略;内环电流控制基于反推方法,同时采用ESO对内环系统模型中的扰动量进行估计,推导出符合Lyapunov渐近稳定理论的反推控制律。最后采用PSCAD/EMTDC进行仿真验证所提混合控制策略的正确性和有效性。

1 永磁直驱风电系统

1.1 永磁直驱风电系统结构

永磁直驱风电系统主要包括风轮机、PMSG、背靠背双PWM换流器和相关控制保护设备等,其并网系统结构如图1所示。

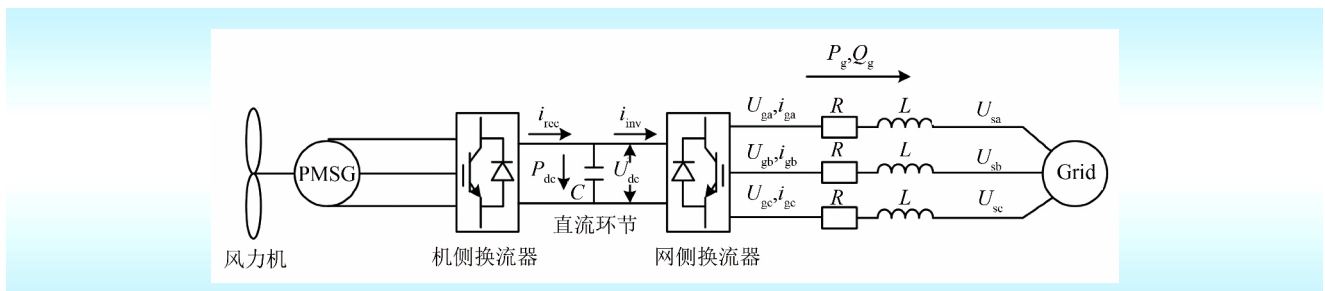


图1 永磁直驱风电系统结构
Fig. 1 Structure of PMSG-based wind power generation system

图1中: P_{dc} 为直流功率; U_{dc} 为中间直流电压; i_{rec} 、 i_{inv} 分别为直流母线两侧电流; U_{ga} 、 U_{gb} 、 U_{gc} 分别为

网侧换流器输出电压; i_{ga} 、 i_{gb} 、 i_{gc} 分别为网侧电流; U_{sa} 、 U_{sb} 、 U_{sc} 分别为三相电网电压; P_g 、 Q_g 分别为网侧

有功功率和无功率; C 为直流环节电容; R 、 L 为网侧电阻和电抗。

1.2 永磁直驱风电系统网侧换流器数学模型

由图 1 可知 dq 同步坐标系下,网侧换流器的动态方程为

$$\begin{cases} U_{gd} = Ri_{gd} + L \frac{di_{gd}}{dt} + U_{sd} - \omega Li_{gq} \\ U_{gq} = Ri_{gq} + L \frac{di_{gq}}{dt} + U_{sq} + \omega Li_{gd} \\ CU_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = i_{rec} U_{dc} - \frac{3}{2} U_{sd} i_{gd} \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_{gd} 、 U_{gq} 分别为换流器输出电压的 d 轴和 q 轴分量; i_{gd} 、 i_{gq} 分别为网侧换流器出口电流的 d 轴和 q 轴分量; U_{sd} 、 U_{sq} 分别为电网电压的 d 轴和 q 轴分量; i_{gd} 、 i_{gq} 分别为电网电流的 d 轴和 q 轴分量; ω 为电网频率。

将电网电压定向于 d 轴,则由永磁直驱风电系统输送至电网的有功功率和无功率可以表示为

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2} U_{sd} i_{gd} \\ Q_g = -\frac{3}{2} U_{sd} i_{gq} \end{cases} \quad (2)$$

2 基于非光滑有限时间理论和扰动补偿的外环控制

电网运行状态直接影响永磁直驱风电系统的并网特性和供电质量,当电网发生电压跌落、短路故障等扰动时,为了在外环直流电压控制中引入对扰动的补偿作用,将式(1)中的直流电压动态方程改写为

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{i_{rec}}{C} - \frac{3U_{sd}}{2CU_{dc}} i_{gd} + D_{dc} \quad (3)$$

式中 D_{dc} 为电网受扰情况下直流电压动态模型的扰动偏差量。

基于式(3),本文将非光滑有限时间控制方法应用到外环直流电压控制中。根据非光滑控制引理^[24-26],对于一阶系统,有

$$\dot{x} = u \quad (4)$$

式中 x 和 u 分别为系统的状态变量和控制律。

选择控制律为

$$u = -k_1 \text{sign}(x) |x|^\alpha \quad (5)$$

式中 k_1 和 α 分别为可调系数,且 $k_1 > 0$ $0 < \alpha < 1$ 。

式(5)表征的一阶系统是全局有限时间稳定的。在式(5)的非光滑控制律下,式(4)表示的一阶系统在有限时间内收敛为 $x = 0$,能够提高系统的收敛速度^[20]。

由于式(3)存在不确定扰动量,需要先对其进行处理,本文采用 ESO 对该扰动量进行估计,并引入到非光滑控制律中进行补偿。根据 ESO 的原理^[27],一个带有未知扰动量的非线性不确定系统可表示为

$$\dot{x}^{(n)} = f(x, x^{(1)}, \dots, x^{(n-1)}, t) + w(t) + bu \quad (6)$$

式中: $f(x, x^{(1)}, \dots, x^{(n-1)}, t)$ 为系统函数; $w(t)$ 为未知扰动量; b 为控制量增益; u 为系统控制量。

根据式(6)的形式,可将式(3)表示为

$$\dot{x}_1 = f_1 + b_1 u_1 + w_1 \quad (7)$$

式中: $x_1 = U_{dc}$; $f_1 = i_{rec}/C$; $b_1 = -3U_{sd}/(2CU_{dc})$; $u_1 = i_{gd}$; $w_1 = D_{dc}$ 。

对于 n 阶系统,ESO 的输出为 $n+1$ 阶,即为 $n+1$ 阶的观测器。根据式(3)的直流电压一阶系统模型,其二阶观测器的标准形式为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = z_{11} - x_1 \\ \dot{z}_{11} = z_{12} - \beta_1 \text{fal}(e_1, \alpha_1, \delta_1) + b_1 u_1 \\ \dot{z}_{12} = -\beta_2 \text{fal}(e_1, \alpha_2, \delta_2) \end{cases} \quad (8)$$

式中: z_{12} 为对直流系统扰动量 D_{dc} 的估计值; β_1 、 β_2 为可调参数; 参数 α_1 、 α_2 通常为介于 0 和 1 之间的常数; 参数 δ_1 、 δ_2 为系统采样周期的倍数。

对于永磁直驱风电系统的中间直流环节,可将其二阶 ESO 表示为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = z_{11} - U_{dc} \\ \dot{z}_{11} = z_{12} - \beta_1 \text{fal}(z_{11} - U_{dc}, \alpha_1, \delta_1) + b_1 i_{gd} \\ \dot{z}_{12} = -\beta_2 \text{fal}(z_{11} - U_{dc}, \alpha_2, \delta_2) \end{cases} \quad (9)$$

其中 fal 函数为

$$\text{fal}(z_{11} - U_{dc}, \alpha_{(1,2)}, \delta_{(1,2)}) = \begin{cases} \frac{z_{11} - U_{dc}}{\delta^{1-\alpha_{(1,2)}}}, & |z_{11} - U_{dc}| \leq \delta_{(1,2)} \\ \text{sign}(z_{11} - U_{dc}) |z_{11} - U_{dc}|^{\alpha_{(1,2)}}, & |z_{11} - U_{dc}| > \delta_{(1,2)} \end{cases} \quad (10)$$

通过式(9)对扰动量 D_{dc} 进行估计并代入式(3),根据式(4)和式(5)所示的非光滑有限时间控制引理,可令

$$u = \frac{i_{rec}}{C} - \frac{3U_{sd}}{2CU_{dc}} i_{gd} + z_{12} \quad (11)$$

为了使直流电压能够快速收敛到参考值,对应非光滑控制引理中式(4)的变量 x 收敛到 0,令 $x = U_{dc} - U_{dc}^*$,即

$$\frac{d(U_{dc} - U_{dc}^*)}{dt} = u \quad (12)$$

永磁直驱风电系统中的直流电压参考值为定值,因此 $dU_{dc}^*/dt = 0$,增加直流电压参考值积分项的式

(11) 与式(3)等效,且符合非光滑有限时间控制律的形式。

根据式(5)设计非光滑控制律,即

$$u = -k \operatorname{sign}(U_{dc} - U_{dc}^*) |U_{dc} - U_{dc}^*|^\alpha \quad (13)$$

联立式(11)和式(13),可得网侧换流器外环直流电压控制律为

$$i_{gd}^* = \frac{1}{3U_{sd}} [2U_{dc} i_{rec} + 3CU_{dc} z_{12} + 2CU_{dc} k \operatorname{sign}(U_{dc} - U_{dc}^*) |U_{dc} - U_{dc}^*|^\alpha] \quad (14)$$

式中 i_{gd}^* 为直流电压控制器输出的内环 d 轴电流参考值。

对于外环无功控制,本文考虑永磁直驱风力发电机运行在单位功率因数状态,故考虑 q 轴电流参考值为0。

3 基于反推方法的内环控制策略

永磁直驱风电系统网侧换流器控制的内环为电流控制环,为利用反推方法进行控制器设计,首先要将式(1)所示的网侧电压方程改写为符合反推控制方法的形式,同时为改进常规反推控制中并未考虑外部扰动对换流器控制效果产生的影响,本文将不确定扰动量引入网侧内环模型中,即

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = ax_2 - \omega x_3 + V_d \\ \dot{x}_3 = ax_3 + \omega x_2 + V_q \end{cases} \quad (15)$$

式中: x_2, x_3 分别为网侧换流器内环模型的状态变量 i_{gd} 和 i_{gq} ; $a = R/L$; $V_d = (U_{sd} - U_{gd})/L + D_d$, $V_q = (U_{sq} - U_{gq})/L + D_q$, D_d 和 D_q 分别为内环模型中的不确定扰动量。

根据反推控制方法^[28],对网侧电流内环考虑 x_2, x_3 的子系统,定义新的误差变量 e_2, e_3 分别为

$$\begin{cases} e_2 = x_2^* - x_2 \\ e_3 = x_3^* - x_3 \end{cases} \quad (16)$$

式中 x_2^*, x_3^* 分别为内环 d 轴和 q 轴电流控制参考值, $x_2^* = i_{gd}^*, x_3^* = i_{gq}^*$ 。

对 x_2, x_3 的子系统,定义 Lyapunov 函数 (V 函数) 为

$$V_n = \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1}{2}e_3^2 \quad (17)$$

对式(17)所表示的 V 函数求导,并将式(15)和式(16)代入,可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &= \dot{e}_2 e_2 + e_3 \dot{e}_3 = e_2(\dot{x}_2^* - \dot{x}_2) + e_3(\dot{x}_3^* - \dot{x}_3) = \\ &e_2(x_2^* - ax_2 + \omega x_3 - V_d) + \\ &e_3(x_3^* - ax_3 - \omega x_2 - V_q) \end{aligned} \quad (18)$$

根据 Lyapunov 渐近稳定理论^[29],为使 x_2, x_3 的子系统渐近稳定,需选定合适的 V_d, V_q ,使 $\dot{V}_n \leq 0$ 。为此,将 V_d, V_q 定义为

$$\begin{cases} V_d = k_2 e_2 + x_2^* - ax_2 + \omega x_3 \\ V_q = k_3 e_3 + x_3^* - ax_3 - \omega x_2 \end{cases} \quad (19)$$

式中 k_2, k_3 为可调参数,且大于0。

将所定义的 V_d, V_q 代入式(18),可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &= e_2(\dot{x}_2^* - ax_2 + \omega x_3 - V_d) + \\ &e_3(\dot{x}_3^* - ax_3 - \omega x_2 - V_q) = \\ &e_2(x_2^* - ax_2 + \omega x_3 - k_2 e_2 - x_2^* + ax_2 - \omega x_3) + \\ &e_3(x_3^* - ax_3 - \omega x_2 - k_3 e_3 - x_3^* + ax_3 + \omega x_2) = \\ &-k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

式(20)表明所选的 V_d, V_q 是合理的,可保证 $\dot{V}_n \leq 0$,即 x_2, x_3 子系统是渐近稳定的。

对 V_d 和 V_q 中的未知扰动分量 D_d, D_q ,利用 ESO 进行估计,同外环系统的处理方式类似,将式(1)中关于 U_{sd} 和 U_{sq} 的方程改写为式(7)的形式,即

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = f_2 + b_2 u_2 + w_2 \\ \dot{x}_3 = f_3 + b_3 u_3 + w_3 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $[x_2, x_3]^T = [i_{gd}, i_{gq}]^T$, $[f_2, f_3]^T = [U_{sd}/L + Ri_{gd}/L - \omega i_{gq}, U_{sq}/L + Ri_{gq}/L + \omega i_{gd}]^T$, $[b_2, b_3]^T = [-1/L, -1/L]^T$, $[u_2, u_3]^T = [U_{gd}, U_{gq}]^T$, $[w_2, w_3]^T = [D_d, D_q]^T$ 。

根据式(21),可分别建立 d 轴和 q 轴的二阶 ESO 的模型为:

$$\begin{cases} e_{22} = z_{21} - i_{gd} \\ \dot{z}_{21} = z_{22} - \beta_3 \operatorname{fal}(z_{21} - i_{gd}, \alpha_3, \delta_3) + b_2 U_{gd} \\ \dot{z}_{22} = -\beta_4 \operatorname{fal}(z_{21} - i_{gd}, \alpha_4, \delta_4) \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} e_{33} = z_{31} - i_{gq} \\ \dot{z}_{31} = z_{32} - \beta_5 \operatorname{fal}(z_{31} - i_{gq}, \alpha_5, \delta_5) + b_3 U_{gq} \\ \dot{z}_{32} = -\beta_6 \operatorname{fal}(z_{31} - i_{gq}, \alpha_6, \delta_6) \end{cases} \quad (23)$$

式中: z_{22} 和 z_{32} 即分别为对扰动量 D_d 和 D_q 的估计值; $\beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ 则为可调参数。

式(22)和式(23)中的 fal 函数分别为:

$$\text{fal}(z_{21} - i_{gd}, \alpha_{(3A)}, \delta_{(3A)}) = \begin{cases} \frac{z_{21} - i_{gd}}{\delta^{1-\alpha_{(3A)}}}, & |z_{21} - i_{gd}| \leq \delta_{(3A)} \\ \text{sign}(z_{21} - i_{gd}) |z_{21} - i_{gd}| \alpha_{(3A)}, & |z_{21} - i_{gd}| > \delta_{(3A)} \end{cases} \quad (24)$$

$$\text{fal}(z_{31} - i_{gq}, \alpha_{(5B)}, \delta_{(5B)}) = \begin{cases} \frac{z_{31} - i_{gq}}{\delta^{1-\alpha_{(5B)}}}, & |z_{31} - i_{gq}| \leq \delta_{(5B)} \\ \text{sign}(z_{31} - i_{gq}) |z_{31} - i_{gq}| \alpha_{(5B)}, & |z_{31} - i_{gq}| > \delta_{(5B)} \end{cases} \quad (25)$$

将 $V_d = [(U_{sd} - U_{gd})/L + D_d]$ 、 $V_q = [(U_{sq} - U_{gq})/L + D_q]$ 、 $x_2 = i_{gd}$ 、 $x_3 = i_{gq}$ 、 $a = R/L$ 及扰动估计值 z_{22} 和 z_{32} 代入式 (19), 可得内环控制器的反推控制律为

$$\begin{cases} U_{gd}^* = U_{sd} - k_2 L (i_{gd}^* - i_{gd}) - \dot{L} i_{gd}^* + Ri_{gd}^* - \omega Li_{gq} + Lz_{22} \\ U_{gq}^* = U_{sq} - k_3 L (i_{gq}^* - i_{gq}) - \dot{L} i_{gq}^* + Ri_{gq} + \omega Li_{gd} + Lz_{32} \end{cases} \quad (26)$$

4 永磁直驱风电系统网侧换流器混合控制策略

本文所提的永磁直驱风电系统网侧混合控制策略为双闭环控制结构, 外环直流电压控制器基于非光滑有限时间控制理论和 ESO 进行设计, 内环电流利用反推控制方法, 并在反推控制律中引入由 ESO 估计的系统扰动量进行补偿, 所建立的网侧换流器整体控制策略如图 2 所示。

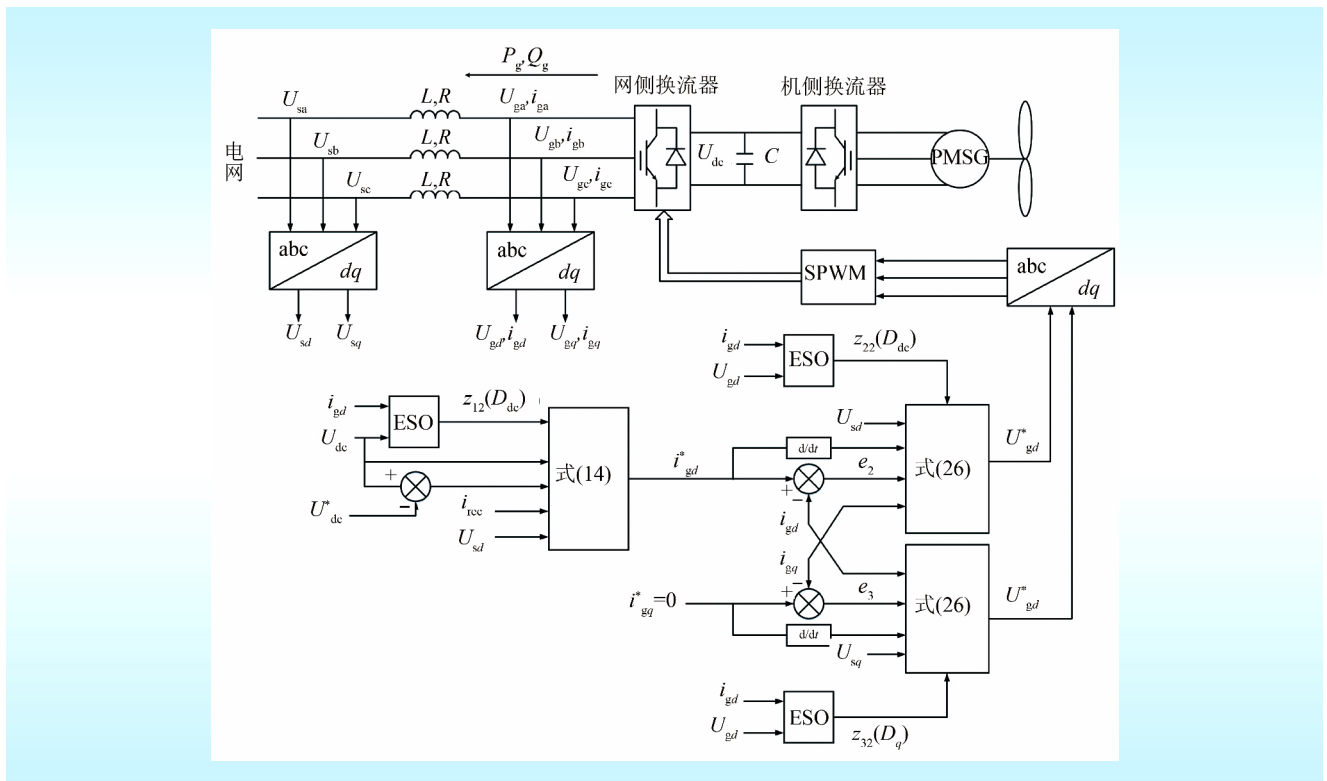


图 2 永磁直驱风电系统网侧换流器整体控制框图

Fig. 2 Overall control diagram of grid-side converter of PMSG-based wind power generation system

5 仿真分析

5.1 仿真系统模型

为验证本文所提永磁直驱风电系统网侧换流器混合控制策略的正确性和有效性, 采用 PSCAD/EMTDC 软件建立如图 1 所示的永磁直驱风电系统并网模型, 仿真所用风力机和发电机的主要参数见表 1。系统其他主要参数为: 直流电压额定值为 4.8 kV; 换流器三相电感为 0.8 mH; 三相电阻为 0.01 Ω; 直

流侧电容为 8 000 μF; 开关频率为 4 kHz。

在仿真中, 通过模拟电网发生不同类型扰动, 对比网侧换流器分别采用常规 PI 控制和本文所提混合控制策略时, 永磁直驱风电系统的并网动态响应特性曲线。

5.2 模拟扰动工况 1

扰动工况 1 的仿真条件为: 风速为 10 m · s⁻¹, 且保持恒定; 当 t < 3 s 时, 系统处于稳定运行状态; 当 t = 3 s 时, 发生电网 A 相电压跌落, 跌落深度为 80%,

表1 风力机和发电机主要参数

Table 1 Main parameters of wind turbine and generator

风力机参数	数值	永磁同步发电机参数	数值
叶片半径/m	56	额定电压/kV	3
切入风速/($m \cdot s^{-1}$)	4	额定功率/($MV \cdot A$)	5.3
额定风速/($m \cdot s^{-1}$)	12	极对数	49
切出风速/($m \cdot s^{-1}$)	25	额定频率/Hz	10
额定容量/MW	5.2	d 轴电抗/mH	11
额定转速/($r \cdot min^{-1}$)	12.24	q 轴电抗/mH	11
空气密度/($kg \cdot m^{-3}$)	1.225	漏抗/mH	1
风能利用率	0.466	永磁体磁链/Wb	41.7

持续时间为0.3 s,仿真总时长为10 s。仿真结果如图3所示。

图3(a)和(b)为电网发生单相电压跌落时,常规PI控制策略与混合控制策略下的直流电压动态响应曲线。由图3(a)和(b)可知,采用混合控制策略,直流电压在电网发生扰动时升高至5.1 kV,波动量为0.3 kV,波动量较小,控制器的鲁棒性更好。采用PI控制策略,在发生扰动时,直流电压的波动量为0.6 kV。对于 $t > 3.3$ s后的系统恢复过程,采用PI控制策略需经过0.9 s才使直流电压重新稳定在参考值,且在调节过程中由于超调而出现了电压持续波动的现象,采用混合控制策略的恢复过程仅需0.2 s,且调节过程更加平稳。

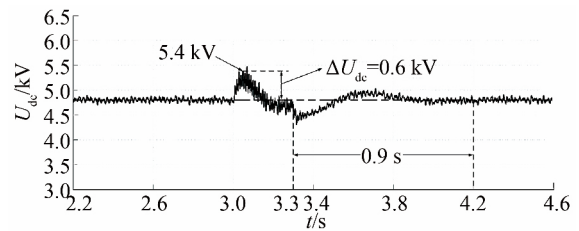
图3(c)~(f)为电网单相电压跌落时的永磁直驱风电系统网侧无功功率和有功功率的动态响应曲线。由图3(c)~(f)可知,与采用PI控制策略相比,采用反推与ESO相结合控制策略的无功功率波动量更小,该控制器使得网侧无功功率在电压扰动期间始终在 $-0.1 \sim 0.1 MV \cdot A$ 的范围波动,且在电压扰动清除后,无功功率的恢复过程更加快速和平稳。采用混合控制策略的有功功率动态响应特性同样优于PI控制策略的结果,在混合控制策略和PI控制策略下,网侧有功功率分别最低跌落至1.85 MW和1.30 MW,而恢复过程所需的调节时间分别为0.2 s和0.9 s。

5.3 模拟扰动工况2

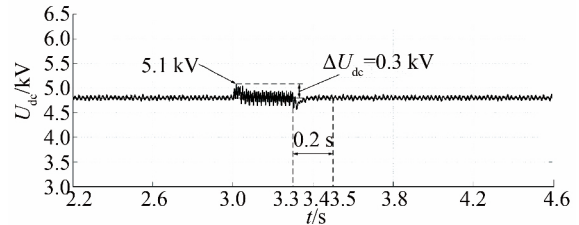
扰动工况2的仿真条件为:风速为 $10 m \cdot s^{-1}$,且保持恒定;当 $t < 3$ s时,系统处于稳定运行状态;当 $t = 3$ s时发生电网A相和B相电压同时跌落,电压跌落深度为50%,持续时间为0.5 s,仿真总时长为10 s。仿真结果如图4所示。

图4(a)和(b)为电网两相电压同时发生跌落后,常规PI控制策略与混合控制策略下的直流电压

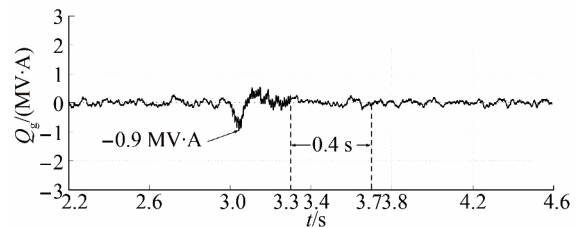
动态响应曲线。由图4(a)和(b)可见,采用PI控制策略和混合控制策略的直流电压在电压波动时分别



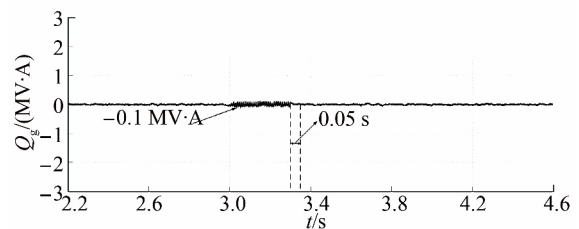
(a)基于PI控制的直流电压



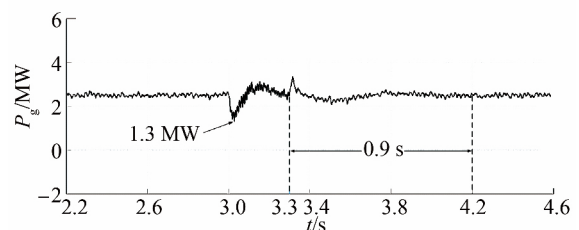
(b)基于混合控制的直流电压



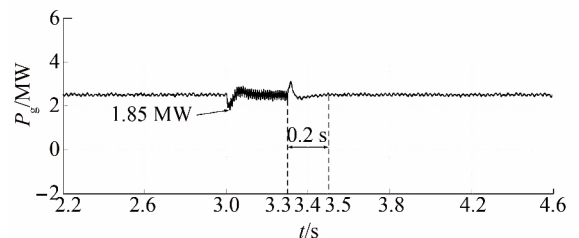
(c)基于PI控制的网侧无功功率



(d)基于混合控制的网侧无功功率



(e)基于PI控制的网侧有功功率



(f)基于混合控制的网侧有功功率

图3 扰动工况1的系统仿真结果

Fig. 3 Simulation waveforms of disturbance condition 1

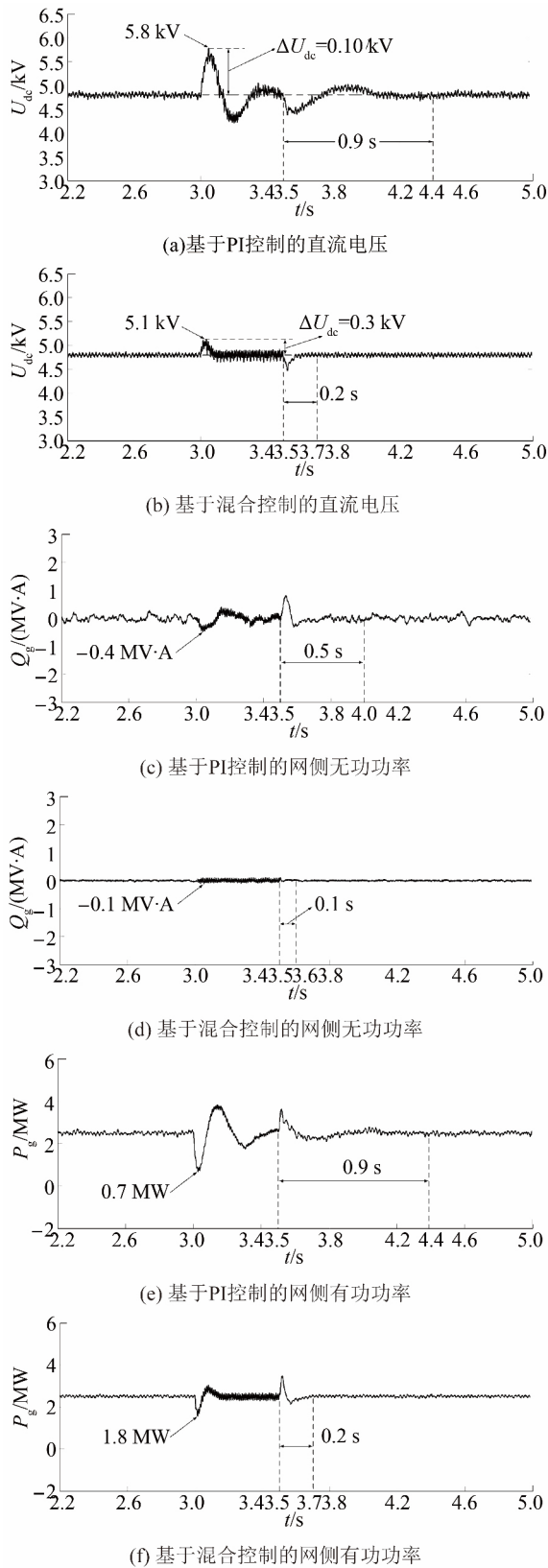


图 4 扰动工况 2 的系统仿真结果

Fig. 4 Simulation waveforms of disturbance condition 2

增大至 5.8 kV 和 5.1 kV 通过混合控制策略能够抑制直流电压的波动,且采用混合控制策略的直流电压能在 $t > 3.5$ s 后更快、更平稳地调节到参考值。

图 4(c) — (f) 为电网两相电压跌落时的永磁直驱风电系统网侧无功功率和有功功率的动态响应曲线。由图 4(c) — (f) 可知,网侧无功控制器采用本文混合控制策略较采用 PI 控制策略的无功功率波动量更小,可将无功功率在电压扰动期间的波动限制在 $-0.1 \sim 0.1 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 的范围内,且能够在电压扰动清除后具备更好的恢复特性。采用混合控制策略的网侧有功功率的动态响应特性也优于 PI 控制策略的结果,本文所提混合控制策略能够抑制有功功率的跌落程度,加快有功功率的恢复速度。

5.4 模拟扰动工况 3

扰动工况 3 的仿真条件为:风速为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且保持恒定;当 $t < 3 \text{ s}$ 时,系统处于稳定运行状态;当 $t = 3 \text{ s}$ 时,电网发生单相接地短路故障,持续时间为 0.2 s ,仿真总时长为 10 s 。仿真结果如图 5 所示。

当电网发生单相接地短路故障时,由图 5(a) 和 (b) 可知,若采用常规的 PI 控制策略,直流电压在故障期间会升高至 5.6 kV ,大幅偏离其参考值,在 $t = 3.2 \text{ s}$ 后,故障清除,需要 0.9 s 才能将直流电压重新调节到参考值,且在直流电压恢复的调节过程中出现了超调现象。当采用本文的混合控制策略时,直流过电压得到有效抑制,提高了大扰动下永磁直驱风电系统并网的鲁棒性,且在故障后直流电压能够快速、平稳地恢复到参考值。

图 5(c) 和 (e) 表明,网侧换流器采用 PI 控制策略时,系统有功功率和无功功率在故障期间的波动量较大,在 $t = 3.2 \text{ s}$ 故障清除后,并不能快速过渡到稳态值,且在系统恢复中持续波动,这表明 PI 控制策略在系统受扰情况下的鲁棒性和动态调节特性较差。由图 5(d) 和 (f) 可知,网侧换流器采用本文的混合控制策略能够抑制网侧有功功率和无功功率在大扰动下的波动,增强了系统的鲁棒性和抗扰动能力,且在故障清除后能够更加快速、平稳地恢复到故障前的状态。

6 结 论

本文针对永磁直驱风电系统网侧换流器的非线性特性以及电网扰动情况下直驱风电系统并网动态特性和鲁棒性较差的问题,提出了一种结合非光滑有限时间控制和反推控制的网侧换流器混合控制策略。以两相同步旋转坐标系下的直驱风电系统网侧数学模型为基础,分别基于非光滑有限时间控制理论和反推控制方法设计了外环直流电压控制器和内环电流控制器,采用 ESO 对扰动造成的系统模型中不确定扰动量进行估计并引入控制器的设计中进行扰动补

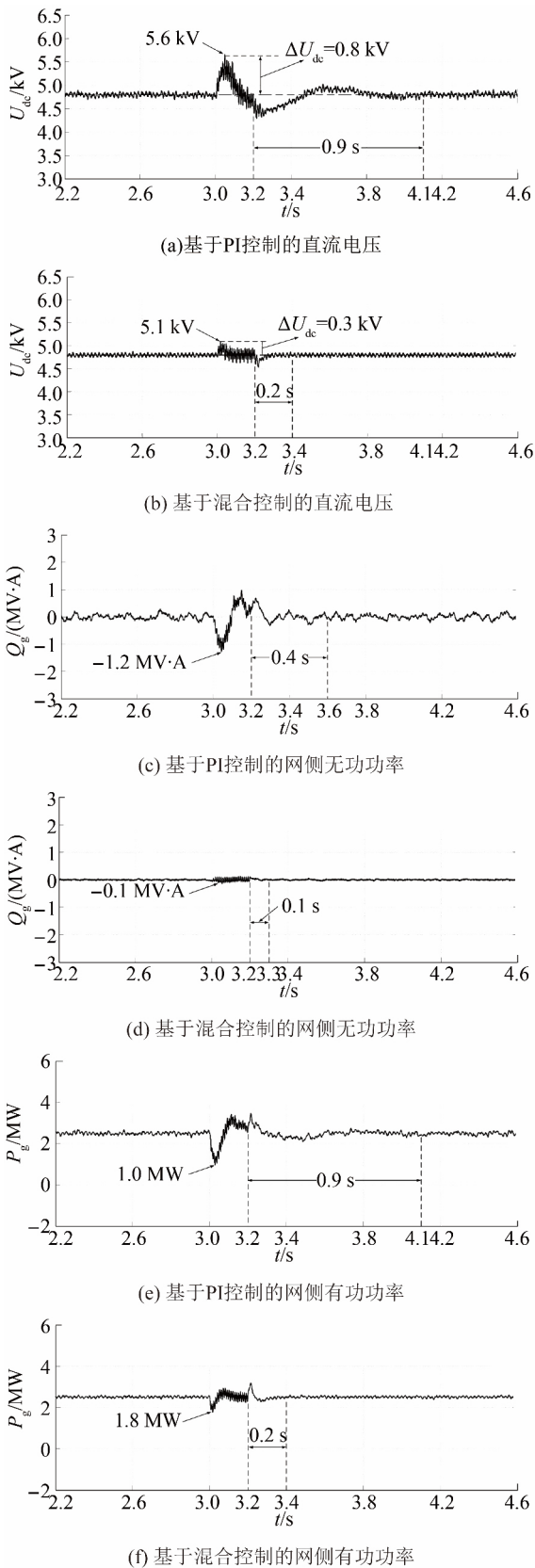


图5 扰动工况3的系统仿真结果

Fig. 5 Simulation waveforms of disturbance condition 3

偿 根据 Lyapunov 渐近稳定理论对内环反推控制律的正确性进行了检验。通过与常规 PI 控制策略的仿

真对比表明,采用本文的混合控制策略可以有效改善电网扰动情况下,永磁直驱风电系统的并网动态响应特性,增强系统的鲁棒性和抗干扰能力。

7 参考文献

[1] 李中成,张步涵,段瑶,等. 含大规模风电场的电力系统概率可用输电能力快速计算[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 505-513.
LI Zhongcheng, ZHANG Buhuan, DUAN Yao, et al. Fast calculation of probabilistic available transfer capability in power system including large-scale wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 505-513.

[2] 孙蔚,姚良忠,李琰,等. 考虑大规模海上风电接入的多电压等级直流电网运行控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 776-785.
SUN Wei, YAO Liangzhong, LI Yan, et al. Study on operation control strategies of DC grid with multi-voltage level considering large offshore wind farm grid integration [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 776-785.

[3] 郭飞,王智冬,王帅,等. 我国风电消纳现状及输送方式[J]. 电力建设, 2014, 35(2): 18-22.
GUO Fei, WANG Zhidong, WANG Shuai, et al. Consumption situation and transmission models of wind power in China [J]. Electric Power Construction, 2014, 35(22): 18-22.

[4] 严干贵,侯延鹏,王健,等. 抑制超速脱网的双馈感应风电机组低电压穿越控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 146-154.
YAN Gangui, HOU Yanpeng, WANG Jian, et al. A DFIG wind turbine low-voltage ride-through control strategy restraining over-speed-tripping-off from grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 146-154.

[5] 周明,葛江北,李庚银. 基于云模型的 DFIG 型风电场动态电压等值方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1097-1105.
ZHOU Ming, GE Jiangbei, LI Gengyin. Cloud model based DFIG wind farm dynamic voltage equivalence method [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1097-1105.

[6] 耿华,许德伟,吴斌,等. 永磁直驱变速风电系统的控制及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 68-75.
GENG Hua, XU Dewei, WU Bin, et al. Control and stability analysis for the permanent magnetic synchronous generator based direct driven variable speed wind energy conversion system [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(33): 68-75.

[7] 杨珍贵,杜雄,孙鹏菊,等. 风电全功率变流器参数对可靠性的影响分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 137-145.
YANG Zhengui, DU Xiong, SUN Pengju, et al. Analysis of effect of the converter parameters on full-rated wind power converters reliability [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 137-145.

[8] RAMADAN H S, SIGUERDIDJANE H, PETIT M, et al. Performance enhancement and robustness assessment of VSC-HVDC transmission systems controllers under uncertainties [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 35(1): 34-46.

[9] 程启明,程尹曼,薛阳,等. 三相电压源型 PWM 整流器控制方法的发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 145-155.
CHENG Qiming, CHENG Yinman, XUE Yang, et al. A summary

- of current control methods for three-phase voltage-source PWM rectifiers[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(3): 145-155.
- [10] 张建坡, 赵成勇, 敬华兵. 比例谐振控制器在 MMC-HVDC 控制中的仿真研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(21): 53-62. ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong, JING Huabing. Simulation research of proportional resonant controllers in MMC-HVDC[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(21): 53-62.
- [11] 马琳, 金新民, 唐芬, 等. 三相并网逆变器比例谐振控制及其网压前馈问题分析[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(8): 56-63. MA Lin, JIN Xinmin, TANG Fen, et al. Analysis of three-phase grid-connected inverter proportional resonant control and grid voltage feed-forward[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(8): 56-63.
- [12] 雷亚雄, 李建文, 李永刚. 基于准 PR 调节器电流双闭环 LCL 三相并网逆变器控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(12): 44-50. LEI Yaxiong, LI Jianwen, LI Yonggang. Control strategy of three-phase LCL grid-connected inverter based on quasi-PR adjuster[J]. *Power System Protection and Control* 2014 42(12): 44-50.
- [13] 王晗, 张建文, 蔡旭. 一种 PWM 整流器动态性能改进控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(增刊): 194-202. WANG Han, ZHANG Jianwen, CAI Xu. An improved control method of the dynamic ability for PWM rectifier[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(Supplement): 194-202.
- [14] 叶虹志, 姜燕, 黄守道, 等. 电压型 PWM 整流器无差拍预测直接功率控制[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(4): 121-128. YE Hongzhi, JIANG Yan, HUANG Shoudao, et al. Deadbeat predictive direct power control for three-phase voltage source PWM rectifiers[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(4): 121-128.
- [15] 郑连清, 池俊锋. 新型 VSC-HVDC 控制器设计[J]. *电网技术*, 2012, 36(6): 210-216. ZHENG Lianqing, CHI Junfeng. Design of a new type of VSC-HVDC controller[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(6): 210-216.
- [16] 张平化, 杨贵杰, 李铁才. 三相 PWM 整流器的反馈线性化直接电压控制[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(18): 39-46. ZHANG Pinghua, YANG Guijie, LI Tiecai. Direct voltage control of three-phase PWM rectifier based on feedback linearization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(18): 39-46.
- [17] 帅定新, 谢运祥, 王晓刚. 三相 PWM 整流器混合非线性控制研究[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(12): 30-35. SHUAI Dingxin, XIE Yunxiang, WANG Xiaogang. Novel hybrid nonlinear control method for three-phase PWM rectifier[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(12): 30-35.
- [18] 张晓华, 郭源博, 佟雷, 等. 三相 PWM 整流器的 dSPACE 实时仿真与控制器参数整定[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(2): 219-224, 232. ZHANG Xiaohua, GUO Yuanbo, TONG Lei, et al. dSPACE real-time simulation and controller parameters tuning for three-phase PWM rectifier[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(2): 219-224, 232.
- [19] 黄凯征, 汪万伟, 王旭. 基于滑模控制的 PWM 整流器建模与仿真[J]. *电网技术*, 2009, 33(8): 18-23. HUANG Kaizheng, WANG Wanwei, WANG Xu. Modeling and simulation of PWM rectifier based on sliding-mode control[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(8): 18-23.
- [20] DING S, LI S, LI Q. Stability analysis for a second-order continuous finite-time control system subject to a disturbance[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2009, 7(3): 271-276.
- [21] KRSTIC M, KANELLAKOPOULOS I, KOKOTOVIC P. *Nonlinear and adaptive control design* [M]. New York: Wiley, 1995: 4475-4480.
- [22] MARTIN A D, CANO J M, SILVA J F A, et al. Backstepping control of smart grid-connected distributed photovoltaic power supplies for telecom equipment[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2015, 30(4): 1496-1504.
- [23] 刘星桥, 唐琳, 周丽. 二阶自抗扰控制器在三电机同步系统中的应用[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(2): 179-184. LIU Xingqiao, TANG Lin, ZHOU Li. Second-order active disturbance rejection controller applied in three-motor synchronous system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2012, 27(2): 179-184.
- [24] BHAT S P, BERNSTEIN D S. Continuous finite-time stabilization of the translational and rotational double integrators[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(5): 678-682.
- [25] BHAT S P, BERNSTEIN D S. Finite-time stability of continuous autonomous systems[J]. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 2000, 38(3): 751-766.
- [26] HONG Y, HUANG J, XU Y. On an output feedback finite-time stabilization problem[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, 46(2): 305-309.
- [27] 姚书龙, 刘志刚, 张桂南, 等. 基于自抗扰控制的牵引网网压低频振荡抑制方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(1): 207-213. YAO Shulong, LIU Zhigang, ZHANG Guinan, et al. A novel approach based on ADRC to traction network voltage low frequency oscillation suppression research[J]. *Power System Technology*, 2016 40(1): 207-213.
- [28] TRABELSI R, KHEDHER A, MIMOUNI M F, et al. Backstepping control for an induction motor using an adaptive sliding rotor-flux observer[J]. *Electric Power Systems Research*, 2012, 93: 1-15.
- [29] HAMADI A, RAHMANI S, AL-HADDAD K. A hybrid passive filter configuration for VAR control and harmonic compensation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(7): 2419-2434.

收稿日期: 2017-01-17

作者简介:

李晖(1981) 男, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网规划;

王丹(1987) 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为风电并网控制、电力系统规划;

李庚银(1964) 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源发电与智能电网、先进输变电技术等;

刘素茹(1977) 女, 博士, 教授, 主要研究方向为交直流混合系统分析与仿真、运行与控制;

张宁(1985) 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为新能源接入的电力系统规划及运行。

(编辑 景贺峰)