

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.01.001

双馈风电场柔性高压直流输电并网控制策略

杨 涛¹, 刘国平², 黄 森², 文一字², 廖 勇¹, 王国栋¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 国网重庆市电力公司 电力科学院, 重庆 401123)

摘 要:针对双馈风力发电机风电场 VSC-HVDC 的系统接入方式提出了一个控制方案,保障电力系统在波动的风电穿透率下的安全和稳定运行,对整个系统的动态模型分别进行了描述,基于矢量控制系统和虚拟电压坐标定向,对 WFVSC 稳态的电压控制模块和引入了 $d-q$ 电流的交叉乘积项的暂态电压控制模块分别进行了设计,用来控制风电场电压的相应部分,同时,考虑交流侧和直流侧的参数变化以及外部扰动,提出了基于 Lyapunov 稳定性判据的 GSVSC 改进 backstepping 控制方案,这两个控制方案构成了本研究所提出的新的控制设计,此外,为验证所提控制方案的性能,假设了 3 种不同的仿真案例,包含交流和直流侧的参数变化,外部扰动如本地负荷的切入切出,电网电压谐波,通过 MATLAB/Simulink 软件模拟 1 台 200 MW 机组 VSC-HVDC 并网运行验证,证明了该方案能够提高系统性能,并在文中做了进一步说明。

关键词:双馈感应电机 (DFIG); 高压直流输电 (HVDC); 电压源换流器 (VSC); 风电场; backstepping; 电能质量

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2015)01-0001-11

A new control design for grid integration of DFIG wind farm with VSC-HVDC

YANG Tao¹, LIU Guoping², HUANG Miao², WEN Yiyu², LIAO Yong¹, WANG Guodong¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China; 2. Electric Power Research Institute of Chongqing Electric Power Company, SG, Chongqing 401123, P.R.China)

Abstract: This paper proposes a control scheme for a doubly-fed induction generator (DFIG) wind farm with VSC-HVDC grid integration to ensure secure and reliable operation of power system with fluctuated wind power penetration. The whole system dynamic models are respectively described. Based on vector control system with a virtual voltage orientation, a steady-state voltage control block and a dynamic voltage control block with a cross-product term of $d-q$ currents are separately designed for WFVSC to control the corresponding parts of the wind farm voltage. Meanwhile, with the consideration of AC and DC side parameter variation and external disturbance, an improved backstepping control scheme with Lyapunov stability provement is also proposed for the GSVSC. The combination of the two schemes makes up the new control design of this study. Besides, to verify the performance of the proposed new control design,

收稿日期: 2014-10-15

基金项目: 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究资助项目 (2007DA10512713303)。

Supported by Self-topic Fund of State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology(2007DA10512713303).

作者简介: 杨涛 (1983-), 男, 重庆大学博士研究生, 主要从事电机运行与控制等方面的研究, (E-mail) 23192771@qq.cm。

three different cases are suggested which contain the AC and DC side parameter variation and external disturbance such as local load cut off-in, grid voltage harmonics. Finally, numerical simulations using MATLAB/Simulink are presented for a 200MW DFIG wind farm with VSC-HVDC grid integration to validate the proposed control scheme and demonstrate the improved system operation performance. Moreover, the corresponding discussions are also presented for further illustrations.

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); high voltage dc transmission (HVDC); voltage source converter (VSC); wind farm; backstepping; power quality

随着世界各地的规划、建设和运营,现代风电场的规模增长迅速,由于自然条件的限制,大多数风电场位置偏远,特别是新兴的海上风电场,这些大型风电场并入电网的距离超过几十千米,对开发者和系统运营者在技术、商业和环境方面都提出了挑战^[1-2],以往,高压交流传输以其成本低、结构简单而被广泛使用,然而,长距离的交流电缆中存在大量的电容电流将显著减少电缆的传输能力^[3]。另一方面,传统的 LCC-HVDC^[4-5]使用的晶闸管正常工作需要一个外部的换向电压,这阻碍了其在弱交流系统中的应用,近年来,采用 IGBT 的 VSC-HVDC 以其无需外部换向电压源、独立的有功无功功率控制等优点受到了越来越多的关注^[6],因为这些优点,一些 VSC-HVDC 装置被用于生产以及运行当中,包括可再生能源通过该方式并网^[7]。在中国,东海大桥海上风电场项目就是对这种可再生能源并网方式的探索和试点,因此,有必要研究风电场通过 VSC-HVDC 并网的控制方案,以及分析在风电场和其连接的电力系统之间的相互作用,以确保随着风电渗透率的增加电力系统的安全性和可靠性。

虽然,对于传统的连接两个独立电力系统的 VSC-HVDC 的研究和控制策略已经得到很多讨论,但对风电场 VSC-HVDC 并网控制研究是一个不同以往的新问题,需要进行研究。一般情况下,分布在 VSC-HVDC 两端的风电场侧的电压源换流器(WFVSC)和电网侧电压源换流器(GSVSC)要根据其不同的控制目标分别设计独立的控制方案,特别地,WFVSC 负责提供一个稳定的风电场电压,以及吸收风电场送出的功率而无需分辨其所得到的功率是有功还是无功。而 GSVSC 作为风电场 VSC-HVDC 输电系统的一部分,负责控制一个稳定的直流电压。至于 WFVSC,通常在控制中加入一个简单的电压幅值控制器^[6,8],虽然这种控制方案简单明了,但是没有电流控制模块,动态性能比较差,而且只能采用间接方式来限制电流。同时,在实践中,可能存在风电场附近的电力需求,例如近海石油平台^[9],因此,本地负荷对于 WFVSC 控制性能的影响仍然需要进一步的研究。同时,由于风力的波动性,变压器饱和,电路老化等所引起的系统参数的变化也需要考虑^[10]。另一方面,由于 GSVSC 直接连接到电网,其控制性能不仅影响到注入电网的风电电能质量,而且还改变 WFVSC 的运行状态,而 WFVSC 正常运行需要一个稳定的直流电压。由于 GSVSC 的非线性耦合结构,以往研究中提出了很多不同的非线性控制方案^[10-13]用于提高传统的 PI 控制性能,近年来,backstepping 控制设计技术由于其在非线性控制方面系统和递归的设计方法而得到高度重视^[13-15],在文献[13]中,用 backstepping 设计了连接两个传统电力系统的 VSC-HVDC 控制方案,却没有考虑由于电容参数和不可预测的外部干扰所造成的不确定性。

在本文的研究中,针对风电场 VSC-HVDC 并网设计了一种新的控制方案,对 WFVSC 和 GSVSC 两个独立的部分分别进行了设计。基于矢量控制系统,采用虚拟电压定向,为 WFVSC 设计了一个稳态电压控制模块,以及一个采用 $d-q$ 电流交叉乘积项的暂态电压控制模块去控制风电场电压的相应部分。同时,考虑交流侧和直流侧参数变化以及外部干扰,基于 Lyapunov 稳定性判据为 GSVSC 提出了改进的 backstepping 控制方法,另外,由于双馈感应电机(Double-Fed Induction Generator, DFIG)在新风电场的广泛应用^[1],在本文的研究中采用了基于 DFIG 的风电场。

1 系统暂态模型描述

通过 VSC-HVDC 并网的双馈风电场结构如图 1 所示。主要由 DFIG 风电场、风电场侧滤波器、风场侧电压源换流器(WFVSC)、高压直流母线、电网侧电压源换流器(GSVSC)、电网侧滤波器以及两侧的升/降压变压器等构成。考虑到可能存在本地负荷的功率需求,因此,在系统结构中考虑了本地负载,其对系统控制性能的影响将在后面进行讨论。

1.1 风力机输出特性模型

风能由风力机的叶片捕获,通过变速箱传递到双馈发电机。根据空气动力学原理,由风力驱动产生的机械能可以通过式(1)^[16]计算得到。

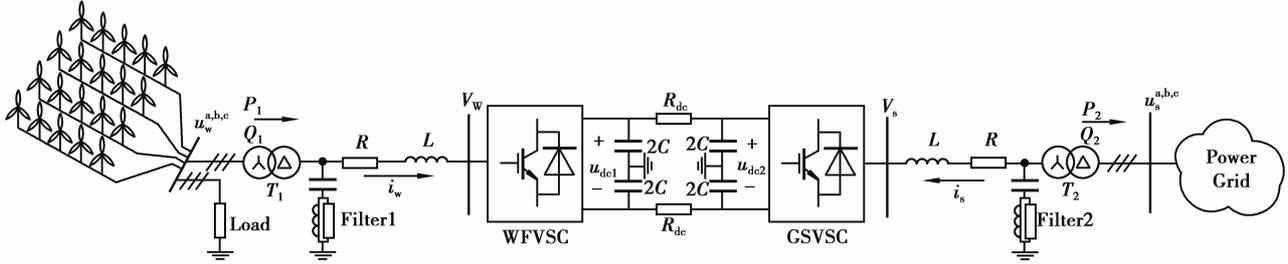


图 1 双馈风电场 VSC-HVDC 接入电网示意图

Fig.1 Schematic diagram of DFIG wind farm with VSC-HVDC integration

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v_w^3, \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度, kg/m^3 ; A 为叶片扫过的面积, m^2 ; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数; λ 为叶尖速比; β 为叶片桨距角; v_w 为风速, m/s 。

1.2 双馈风力发电机模型

根据双馈风力发电机系统的配置,一个同步参考轴系下双馈发电机矢量等效电路^[17]如图 2 所示,其中定子电压相量与 d 轴重合, q 轴超前 d 轴。相应的双馈发电机在 dq 同步坐标轴系下的动态方程为

$$\begin{cases} u_w = R_s i_w + \frac{d\psi_w}{dt} + j\omega_w \psi_w, \\ u_r = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega_w - \omega_r) \psi_r, \\ \psi_w = L_s i_w + L_m i_r, \\ \psi_r = L_r i_r + L_m i_w, \\ L_s = L_{s\sigma} + L_m, \\ L_r = L_{r\sigma} + L_m; \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_w, u_r, ψ_w, ψ_r 分别为定子和转子电压空间矢量和磁链空间矢量; i_w, i_r 分别为定、转子电流空间矢量; R_s, R_r 分别为定、转子电阻; ω_w, ω_r 为风电场电压电角频率、转子电角频率; $L_s, L_{s\sigma}, L_r, L_{r\sigma}, L_m$ 分别为定子全自感、定子漏感、转子全自感、转子漏感、定、转子互感。

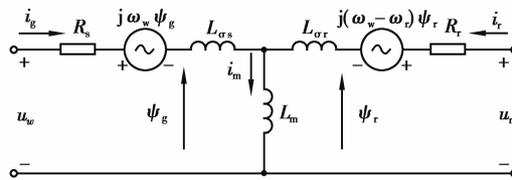


图 2 同步旋转坐标轴系下 DFIG 矢量形式等效电路图

Fig.2 Equivalent circuits of a DFIG system in the synchronous reference frame

1.3 风电场侧电压源换流器 WFVSC 模型

dq 同步旋转坐标系在角速度 ω_s 的转动下,风电场侧电压源换流器 WFVSC 的动态方程为

$$\begin{cases} L_w \frac{di_{wd}}{dt} = -R_w i_{wd} + \omega_w L_w i_{wq} - v_{wd} + u_{wd}, \\ L_w \frac{di_{wq}}{dt} = -R_w i_{wq} - \omega_w L_w i_{wd} - v_{wq} + u_{wq}; \end{cases} \quad (3)$$

式中： u_{wd} 、 u_{wq} 和 i_{wd} 、 i_{wq} 分别为风电场母线电压和电流的 d 、 q 轴分量； v_{wd} 和 v_{wq} 为WFVSC交流侧基波电压的 d 、 q 轴分量； R_w 、 L_w 分别为包含了变压器 T_1 ，在WFVSC与风电场之间传输线路上的等效电阻和电抗； ω_w 为风电场电网的角频率。相应地在以角速度 ω_w 的同步旋转坐标轴系下WFVSC交流侧矢量等效电路如图3所示。

WFVSC动态模型在系统稳态情况下的数学模型为

$$\begin{cases} u_{wd} = R_w i_{wd} - \omega_w L_w i_{wq} + v_{wd}, \\ u_{wq} = R_w i_{wq} + \omega_w L_w i_{wd} + v_{wq}. \end{cases} \quad (4)$$

将风电场控制运行在给定电压下，相应的风电场 dq 稳态电压分量可以通过公式(4)计算出来。

1.4 电网侧电压源换流器 GSVSC 模型

类似地，电网侧电压源换流器(GSVSC)在以同步角速度 ω_s 旋转的 d - q 同步旋转坐标系下的暂态方程可以写为

$$\begin{cases} L_s \frac{di_{sd}}{dt} = -R_s i_{sd} + \omega_s L_s i_{sq} - v_{sd} + u_{sd}, \\ L_s \frac{di_{sq}}{dt} = -R_s i_{sq} - \omega_s L_s i_{sd} - v_{sq} + u_{sq}, \end{cases} \quad (5)$$

式中： u_{sd} 、 u_{sq} 和 i_{sd} 、 i_{sq} 分别为风场母线电压、电流的 d 、 q 轴分量； v_{sd} 和 v_{sq} 分别为GSVSC交流侧电压的 d 、 q 轴分量； R_s 、 L_s 分别为GSVSC和包含了变压器 T_2 的风电场之间传输线上等效电阻和电感； ω_s 为风电场电网的角频率。式(3)中的有功功率和无功功率可以表示为

$$\begin{cases} P_2 = -1.5(u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}), \\ Q_2 = -1.5(u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}); \end{cases} \quad (6)$$

另一方面，GSVSC侧直流链动态方程为

$$\frac{du_{dc2}}{dt} = -\frac{1.5\eta(u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq})}{Cu_{dc2}} + \frac{i_{dc}}{C}, \quad (7)$$

式中： η 为GSVSC的功率转换效率； u_{dc2} 为GSVSC的直流链电压； i_{dc} 为传输电缆的直流电流； C 为等效的直流电容。相应的GSVSC交流侧和直流侧的等效电路如图4所示。

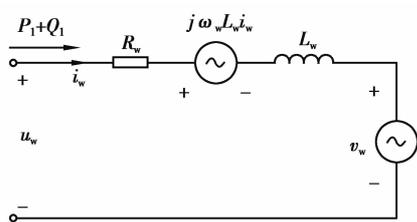


图3 同步旋转坐标轴系下WFVSC等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuits of WFVSC in the synchronous reference frame

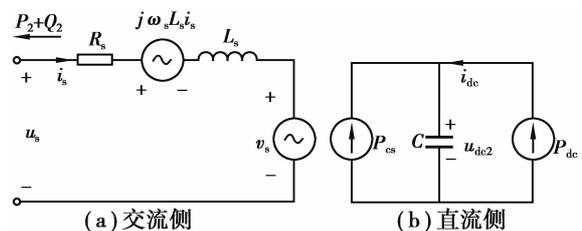


图4 GSVSC交流侧和直流侧等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuits for AC(a) and DC side(b) of GSVSC

2 DFIG 风电场 VSC-HVDC 并网控制设计

2.1 DFIG 风电场控制设计

风电场风机数量往往可以达到上百台，因此，风电场控制变得很复杂。为了加快仿真速度，有必要利用合理的风电场等值模型替代多台风机进行仿真。风电场有很多种等值方式，比如文献[6]用风电场集中模型来简化整个风电场，但是风电场等值并不是本文的重点。笔者采用的双馈风力发电机集中等值整个风电场。

双馈发电机采用的控制策略为定子磁场定向矢量控制和最大风能跟踪策略,网侧变换器调制直流链电压。由于这一控制策略很成熟,因此不再详细介绍。

2.2 Wfvsc 控制方案

DFIG 风电场通过 VSC-HVDC 接入电网的方式下,Wfvsc 是用来收集风电场送出来的能量,控制目标是希望其作为一个松弛节点,控制风电场公共接入点(point of common coupling,PCC)电压的幅值和相位,当风电场接入后,Wfvsc 自动吸收风电场送过来的功率。此外,频率控制也可以引入到 Wfvsc 控制中,进而影响 DFIG 并网电压。在特定的条件下^[6],可以通过 Wfvsc 改变 PCC 节点的频率。但是,如果风电场有本地负荷,频率变化必须控制在一定的范围之内。

Wfvsc 等效电路如图 4 所示,风场电压 u_w 可通过控制 Wfvsc 交流侧电压 v_w 间接控制。为了改善风场电压动态响应和降低系统阻抗对风场电压控制的影响,稳态电压控制引入了基于 $d-q$ 电流交叉解耦的控制。引入 $d-q$ 电流交叉项,改善了风电场电压对 Wfvsc 和风电场之间阻抗变化的响应,但是这一控制以矢量控制和准确的坐标定向为基础,不像大电网可以提供稳定的交流电压,风电场电压是变化的,为了改善对风电场母线压的控制性能,引入基于 Wfvsc 虚拟初始电压定向的风电场母线压矢量控制,将同步 $d-q$ 轴系定向到 v_w 矢量,因此, v_w 矢量可以表示为: $v_{wd}^* = v_w, v_{wq}^* = 0$,设定值 $v_{wd}^* = v_w^0$,风电场电压频率设定为 50 Hz。

风场侧变换器的控制目标是稳定交流电压,也就是说 u_{wd} 和 u_{wq} 合成的 u_w 矢量幅值必须保持恒定。为此,笔者在风电场电压控制中引入静态电压调节模块和动态电压调节模块,提高系统的动态响应能力和稳态运行效果。Wfvsc 最终的控制电压由静态调节分量(v_{wd}^1, v_{wq}^1)、动态调节分量(v_{wd}^2, v_{wq}^2)和设定值(v_{wd}^*, v_{wq}^*)构成。

对于稳态电压控制模块,按照式(4),输出控制措施由下式给出:

$$\begin{cases} v_{wd}^1 = u_{wd}^* - R_w i_{wd}^* + \omega_w L_w i_{wq}^* \\ v_{wq}^1 = u_{wq}^* - R_w i_{wq}^* - \omega_w L_w i_{wd}^* \end{cases} \quad (8)$$

式中: u_{wd}^* 和 u_{wq}^* 分别为风电场参考电压矢量 u_w^* 的 d, q 轴分量; i_{wd}^* 和 i_{wq}^* 分别为电压 PI 控制器输出,由式(9)给出:

$$\begin{cases} i_{wd}^* = k_{p1}(u_{wq}^* - u_{wq}) + k_{i1} \int (u_{wq}^* - u_{wq}) dt \\ i_{wq}^* = -k_{p1}(u_{wd}^* - u_{wd}) - k_{i1} \int (u_{wd}^* - u_{wd}) dt \end{cases} \quad (9)$$

对于动态调节分量如式(10)所示,采用了带交叉乘积项的电流解耦控制结构,分别在 d, q 轴电流通道补偿交叉耦合的分量。

$$\begin{cases} v_{wd}^2 = -R_w i_{wd_cross} + \omega_w L_w i_{wq_cross} \\ v_{wq}^2 = -R_w i_{wq_cross} - \omega_w L_w i_{wd_cross} \end{cases} \quad (10)$$

式中: i_{wd_cross} 和 i_{wq_cross} 分别由式(11)给出:

$$\begin{cases} i_{wd_cross} = k_{p2}(i_{wq}^* - i_{wq}) + k_{i2} \int (i_{wq}^* - i_{wq}) dt \\ i_{wq_cross} = k_{p2}(i_{wd}^* - i_{wd}) + k_{i2} \int (i_{wd}^* - i_{wd}) dt \end{cases} \quad (11)$$

最终,Wfvsc 控制电压如下所示:

$$\begin{cases} v_{wd} = v_{wd}^* + \Delta v_{wd} \\ v_{wq} = v_{wq}^* + \Delta v_{wq} \end{cases} \quad (12)$$

其中 Δv_{wd} 和 Δv_{wq} 分别由下式给出:

$$\begin{cases} \Delta v_{wd} = v_{wd}^1 + v_{wd}^2 \\ \Delta v_{wq} = v_{wq}^1 + v_{wq}^2 \end{cases} \quad (13)$$

Wfvsc 控制框图如图 5 所示。

2.3 Gsvsc 控制方案

在实际应用中,线路阻抗通过短路容量计算得到,但是间歇性风电会改变线路阻抗,同时线路老化阻抗也会变化,这些导致了系统运行点的变化。直流电容参数和外部干扰因素也会对 Gsvsc 运行产生影响。因此,有必要考虑不确定因素对 Gsvsc 控制的影响,这些因素会影响馈送到电网的风电电能质量。

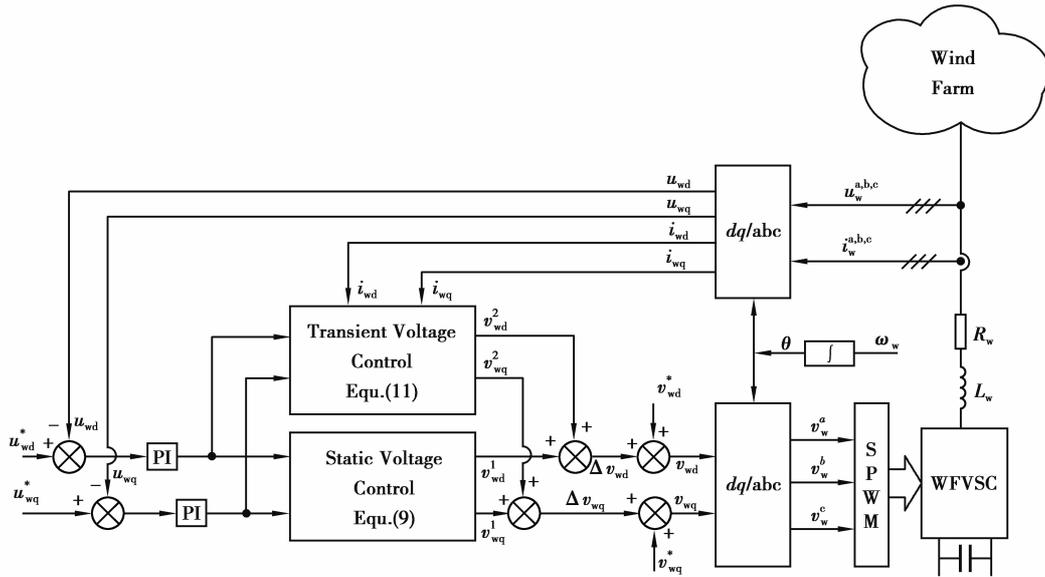


图 5 WFVSC 控制方案示意图

Fig.5 Schematic diagram of the proposed control scheme for WFVSC

考虑这些影响因素到控制器设计以后,式(5)和式(7)可改写为

$$\dot{x} = -M^{-1}Bx - M^{-1}l_v + M^{-1}(G_s v_s + u_s), \quad (14a)$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{1.5\eta u_{sd} x_1}{\bar{C} x_3} - \frac{1.5\eta u_{sq} x_2}{\bar{C} x_3} + \frac{i_{dc}}{\bar{C}} + l_{dc}; \quad (14b)$$

式中: $l_v = \Delta \dot{M}x + \Delta Bx + f_0$ 和 $l_{dc} = [f_{dc} - \Delta \dot{C}x_3]/\bar{C}$ 分别为 GSVSC 交流侧和直流侧集总不确定因素,由参数变化和外部扰动引起。 f_0 和 f_{dc} 分别为实际的交流侧和直流侧扰动。

$$x = [x_1 \quad x_2]^T; \quad x_3 = u_{dc2}; \quad u_s = [u_{sd} \quad u_{sq}]^T; \quad v_s = [v_{sd} \quad v_{sq}]^T; \quad M = \begin{bmatrix} \bar{L}_s & 0 \\ 0 & \bar{L}_s \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \bar{R}_s & -\omega_s \bar{L}_s \\ \omega_s \bar{L}_s & \bar{R}_s \end{bmatrix};$$

$$G_s = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}; \quad \Delta M = \begin{bmatrix} \Delta \bar{L}_s & 0 \\ 0 & \Delta \bar{L}_s \end{bmatrix}; \quad \Delta B = \begin{bmatrix} \Delta \bar{R}_s & -\omega_s \Delta \bar{L}_s \\ \omega_s \Delta \bar{L}_s & \Delta \bar{R}_s \end{bmatrix}, \quad \bar{R}_s, \bar{L}_s \text{ 和 } \bar{C} \text{ 分别为 } R_s, L_s \text{ 和 } C \text{ 的额定值,}$$

$\Delta \bar{R}_s, \Delta \bar{L}_s$ 和 ΔC 分别为直流和交流侧参数不确定性引起的变化量。集总不确定因素边界条件为 $\|l_v\| < \rho_s$ 和 $|l_{dc}| < \rho_{dc}$, 其中 ρ_s 和 ρ_{dc} 为正值。

GSVSC 控制器设计引入了改进 backstepping 控制策略。控制策略引入了 sign 函数,以及考虑了 GSVSC 交流侧和直流侧参数变化和外部扰动引起的扰动。GSVSC 的控制目标是稳定直流电压和控制无功输出,为了最大利用换流器,无功控制往往控制无功输出为零。为了实现 GSVSC 有功和无功的控制解耦,选取电网电压定向的 d - q 同步坐标轴系^[18]。轴系分量为: $u_{sd} = U_s$ 和 $u_{sq} = 0$, 为电网电压的额定幅值。在 d - q 同步坐标轴系下,GSVSC 的 backstepping 控制策略如下所述:

首先,定义直流电压控制误差 $e_{dc} = x_{3ref} - x_3$, x_{3ref} 为直流电压的给定参考值,设计第 1 个的 Lyapunov 函数为 $V_1 = 0.5e_{dc}^2$, 结合式(14b), 得到 V_1 微分表达式为

$$\dot{V}_1 = e_{dc} \dot{e}_{dc} = e_{dc} \left(\dot{x}_{3ref} + \frac{1.5\eta u_{sd} x_1}{\bar{C} x_3} - \frac{i_{dc}}{\bar{C}} - l_{dc} \right). \quad (15)$$

定义虚拟的控制输入为 x , 定义它的控制偏差为 $e_s = \alpha - x$, 其中 $\alpha = [x_{1ref} \quad x_{2ref}]^T$, x_{1ref} 和 x_{2ref} 分别为各自的控制给定, 如果设计 x_{1ref} 为

$$x_{1ref} = -\frac{\bar{C} x_3}{1.5\eta u_{s1}} \left[\dot{x}_{3ref} - \frac{i_{dc}}{\bar{C}} + k_0 e_{dc} + \rho_{dc} \text{sgn}(e_{dc}) \right]. \quad (16)$$

其中, k_0 是正常数, $\text{sgn}()$ 是 sign 函数。因此, 式(15)可整理为

$$\dot{V}_1 \leq -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_0 \mathbf{e} + \mathbf{e}_s^T \mathbf{C} \mathbf{e}, \quad (17)$$

其中, $\mathbf{e} = [e_{dc} \quad 0]^T$; $\mathbf{K}_0 = \begin{bmatrix} k_0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T$; $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -\frac{1.5u_{sd}}{\bar{C}x_3} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T$, k_0 为给定的正常数。

由于选取 GSVSC 单位功率因数运行来充分利用变换器性能, 相应设计 $x_{2\text{ref}}$ 为

$$x_{2\text{ref}} = 0. \quad (18)$$

结合(14a), 可以得到虚拟控制力的控制偏差 e_s 的微分表达式为

$$\dot{e}_s = \dot{\alpha} - \dot{x} = \dot{\alpha} + \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{x} + \mathbf{M}^{-1} l_v - \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{G}_s v_s + u_s). \quad (19)$$

设计第 2 个 Lyapunov 函数为 $V_2 = V_1 + 0.5 \mathbf{e}_s^T \mathbf{M} \mathbf{e}_s$, 结合式(17)和式(19)可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + \mathbf{e}_s^T \dot{\mathbf{M}} \mathbf{e}_s / 2 + \mathbf{e}_s^T \dot{\mathbf{M}} \mathbf{e}_s \leq \\ & -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_0 \mathbf{e} + \mathbf{e}_s^T \mathbf{C} \mathbf{e} + \mathbf{e}_s^T \mathbf{M} [\dot{\alpha} + \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{x} + \mathbf{M}^{-1} l_v - \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{G}_s v_s + u_s)] \leq \\ & -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_0 \mathbf{e} + \mathbf{e}_s^T \mathbf{C} \mathbf{e} + \mathbf{e}_s^T (\mathbf{M} \dot{\alpha} + \mathbf{B} \mathbf{x} + l_v - \mathbf{G}_s v_s - u_s). \end{aligned} \quad (20)$$

根据式(20), 依据 backstepping 控制规则设计最终的控制量为

$$v_s = \mathbf{G}_s^{-1} [\mathbf{M} \dot{\alpha} + \mathbf{B} \mathbf{x} + \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_s + \mathbf{C} \mathbf{e} + \rho_s \text{sgn}(e_s) - u_s]. \quad (21)$$

式中: \mathbf{K}_1 为给定的正常数对角正矩阵。

为了说明所提控制策略的系统稳定性, 依据 Lyapunov 稳定性判据^[19], 可证明:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_0 \mathbf{e} - \mathbf{e}_s^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_s + \mathbf{e}_s^T l_v - |\mathbf{e}_s^T| \rho_s \leq \\ & -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_0 \mathbf{e} - \mathbf{e}_s^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_s + |\mathbf{e}_s^T| |l_v| - |\mathbf{e}_s^T| \rho_s \leq \\ & -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_0 \mathbf{e} - \mathbf{e}_s^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_s - |\mathbf{e}_s^T| (\rho_s - |l_v|) \leq \\ & -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_0 \mathbf{e} - \mathbf{e}_s^T \mathbf{K}_1 \mathbf{e}_s < 0. \end{aligned} \quad (22)$$

由于 V_2 是一个负函数, 可以推断 e 和 e_s 渐近地趋于 0。如果 GSVSC 的交直流侧集总不确定量可以分别满足 $\|l_v\| < \rho_s$ 和 $|l_{dc}| < \rho_{dc}$ 。那么就可以保证所设计控制策略的稳定性。从整体的控制设计过程来看, 改进 backstepping 控制策略是通过引入 sign 函数和定义有界的集总不确定量, 使得设计在控制力中可以有效应对 GSVSC 交直流侧系统不确定性的影响, 此外也降低了传统 backstepping 控制策略的振荡现象。具体的 GSVSC 控制框图如图 6 所示。

3 仿真验证和分析

为了验证所提控制策略的正确性和有效性, 采用 Matlab/Simulink 软件进行数值仿真, 在本研究中所使用的 DFIG 风电场的 VSC-HVDC 接入系统如图 1 所示, 包含了一个使用双馈风力发电总容量为 200 MW 的风电场, 通过 200 MW/ ± 150 kV VSC-HVDC 连接方式接入到电网中, DFIG 风电场集中模型^[20]的详细参数在附录 B 中给出。图 7 展示了等效风力涡轮机的功率特性(桨距角=0°)以及文中所用的 DFIG 最大功率跟踪点曲线。

一个 50 MW 的本地负载是用来检查在所提出的控制方案下其对系统运行性能的影响, 如图 1 所示, 风电场侧 VSC(WFVSC)和电网侧 VSC(GSVSC)的 VSC-HVDC 采用三电平中性点钳位的变换器, 它比两电平的变换器的功率损耗更小。直流输电线路长 100 km, 直流链两端的电容设计为 35 μF , 相应的单个电容器时间常数设置为 8 ms, 满足小纹波近似和快速响应系统功率变化的要求^[21]。VSC 开关频率设置为 1.35 kHz, 这样产生的谐波频率主要在 2.7 kHz 及其倍数以上, 能够被 VSC-HVDC 两端的滤波器滤除。690V/110 kV 变压器 T1 用于连接到 WFVSC, 而 GSVSC 通过 110 kV/230 kV 的一级变压器 T2 连接到受端系统。

为了说明针对 DFIG 风电场通过 VSC-HVDC 并网所提控制设计的优点, 在本研究中设计了 3 种不同的仿真案例用于表明所提方案有更高的性能, 在仿真案例的设计中考虑了交流和直流传输阻抗和直流电容系统参数变化的因素, 以及由此带来的本地负载以及电网电压的变化。相应的仿真案例和仿真结果如下所述:

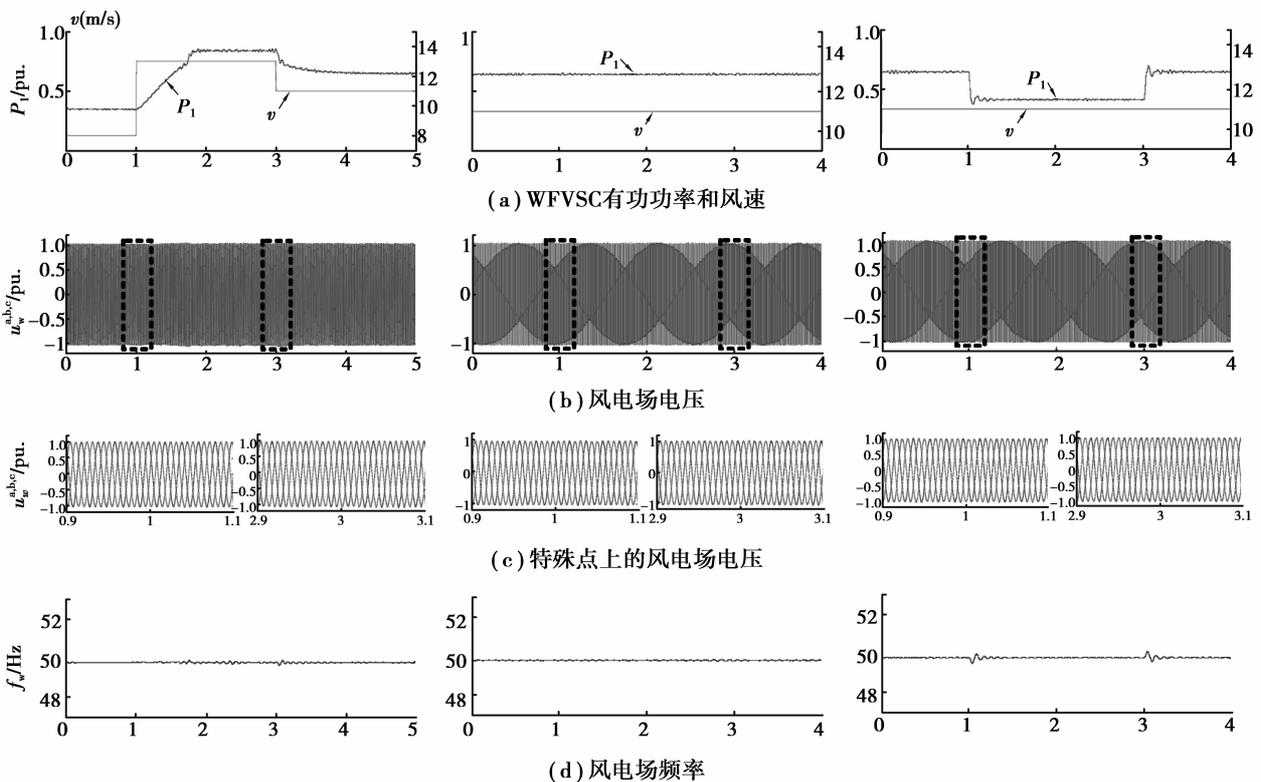
何变化,风电场输出功率总是限制在额定输出功率,GSVSC 能够平滑地将这些功率输入到电网。如图 7(A)中(b)、(c)和(d)所示,在不同的风力输送甚至风力出现突然的变化的状况下,所设计的 WFVSC 控制器能够有效控制风电场电压和频率维持在预定值。如图 7(A)中(e)、(f)和(g)所示,所设计的 GSVSC 控制器能够很好的维持直流电压和无功输出。由于 GSVSC 的无功功率保持在 0,GSVSC 能够运行在单位功率因素,这样能够使变流器最大化利用从风电场得到的能量,并输送到电网中,这在图 7(A)中(i)和(j)得到进一步的验证,这些图表明了电网电压和电流波形在 A 相是同相位的,此外,充分地保证了电网电能质量。

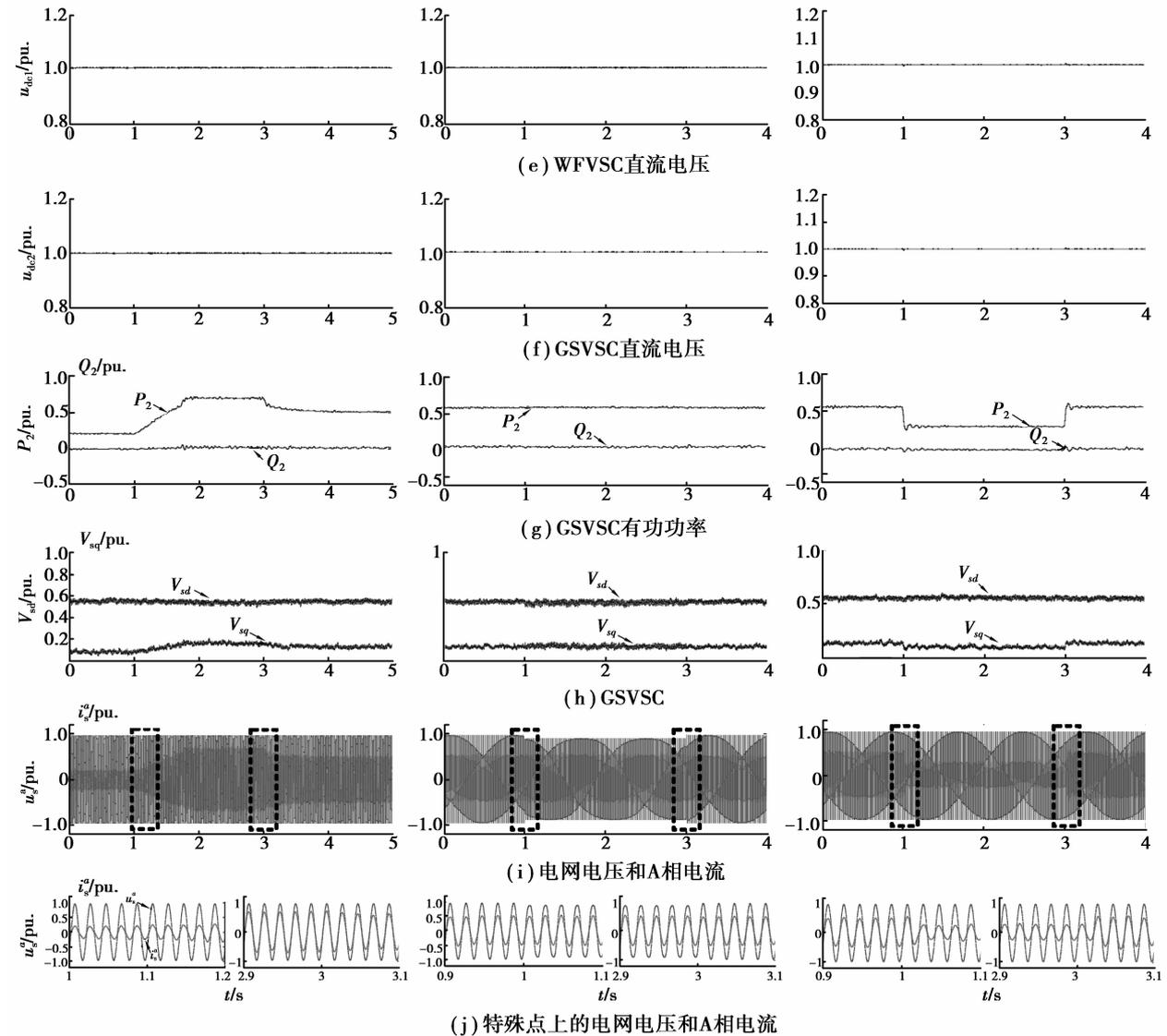
3.2 案例 2 仿真结果和分析

图 7(B)的仿真结果示出了所提控制方案在案例 2 下的控制性能,与案例 1 相比,案例 2 中没有风电场功率的波动,风速被设定为 11 m/s,以一个恒定的风力发电传输如图 7(B)中(a)所示,然而,WFVSC 交流侧等效阻抗增加了 20%,用以检查所提出的 WFVSC 控制器在系统参数变化时的响应,图 7(B)中(b)、(c)和(d)所示的仿真结果中,虽然系统参数发生了变化,但是风电场的电压和频率依然能够维持在预定值上,而对于 GSVSC 控制器,一个幅值为 0.2 pu 加上 3 次谐波的外部电压扰动在 1~3 s 时注入电网中,如图 7(A)中(e)、(f)、(g)、(i)和(j)所示,直流电压和 GSVSC 的无功功率依然能够控制在指令值而没有受到任何影响,从而保证了电网电能质量。此外,从图 7(B)的仿真结果可以得出一个结论,风电场侧的参数变化以及电网侧的电压扰动对相应部分设计的控制器没有造成任何影响。

3.3 案例 3 仿真结果和分析

图 7(C)的仿真结果展示了所提控制方案在案例 3 下的控制性能,与案例 2 相比,如图 7(C)中(a)所示,在风速没有波动的情况下,有一个 50 MW 的本地负荷在 1s 时切入到风电场,然后在 3 s 时切出,此外,在案例 3 仿真时长内,考虑在 GSVSC 交流侧等效阻抗和直流侧电容增加了 20%,从图 7(C)中(e)、(f)和(g)的仿真结果所示,虽然有直接影响输入到电网功率的本地负荷的突然变化,但是风电场电压依然保持在满足要求的值上,由于大量的有功功率切入和切出,风电场的频率在 1~3 s 内出现了波动,但是,在这种情况下,仍然是可以接受的。而对于 GSVSC 控制器,虽然交流侧等效阻抗和直流侧电容增加了 20%,但是 GSVSC 直流电压也能很好地控制在指令值上而没有受到任何影响,虽然 GSVSC 的无功功率出现了波动,但其幅值很小、而且也很快衰减了,图 7(C)中(i)和(j)表明,电网的电能质量在这种情况下,仍然能达到满意的结果。





(A) Proposed control scheme under Case 1 (B) Proposed control scheme under Case 2 (C) Proposed control scheme under Case 3

图 7 3 种不同仿真案例下 DFIG 风电场 VSC-HVDC 并网仿真结果

Fig.7 Simulation results of the DFIG wind farm with VSC-HVDC under the three different simulated cases

4 结 论

介绍了在双馈风电场通过 VSC-HVDC 并网的一种新的控制方案,这种新控制方案包含了 WFVSC 和 GSVSC 两个独立部分,并分别进行了设计。通过 MATLAB/Simulink 进行的数值仿真结果表明了所提控制方案具有满意的性能。

1) 为 WFVSC 设计了一个新的控制方案,基于矢量控制系统和虚拟电压坐标定向,对稳态的电压控制模块和暂态电压控制模块设计为分别用来控制风电场电压的相应部分,此外,一个 $d-q$ 电流的交叉乘积项被引入到动态电压控制模块中,不仅提高了系统的控制响应,也减小了由于系统参数变化引起的影响。

2) 得到了一个考虑交流侧和直流侧参数变化和外部扰动的 GSVSC 暂态方程。

3) 根据新的 GSVSC 暂态方程,提出了一个改进的 backstepping 控制方案,符号函数的乘积以及引入到最后的 backstepping 控制中集总的不确定性边界,从而降低传统 backstepping 控制中的抖振现象,是对 GSVSC 控制的主要改进。

4) 利用 Lyapunov 稳定性理论,证明了控制方案的稳定性。

5) 针对 DFIG 风电场 VSC-HVDC 接入系统所提控制方案具有鲁棒性,不仅提高了电网的电能质量,增

强了安全性,也增强了即使在出现风力波动和本地负荷扰动情况下电力系统运行的可靠性。

参考文献:

- [1] Chen Z, Blaabjerg F. Wind farm—a power source in future power systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(6): 1288-1300.
- [2] Li H, Yang C, Zhao B, et al. Aggregated models and transient performances of a mixed wind farm with different wind turbine generator systems[J]. *Electric Power Systems Research* 2012(92): 1-10.
- [3] Cole S, Belman R. Transmission of bulk power: the history and applications of voltage-source converter high voltage direct current systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 3(3): 19-24.
- [4] Xiang D W, Li R, Bumby J R, et al. Coordinated control of an HVDC link and doubly fed induction generators in a large offshore wind farm[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(1): 463-471.
- [5] Zhou H, Yang G, Wang J, et al. Control of a hybrid high-voltage DC connection for large doubly fed induction generator-based wind farms[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2011, 5(1): 36-47.
- [6] Xu L, Yao L Z, Sasse C. Grid integration of large dfig-based wind farms using vsc transmission[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(3): 976-984.
- [7] Flourentzou N, Agelidis V G, Demetriades G D. Vsc-based hvdc power transmission systems: an overview[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(3): 592-602.
- [8] Ramadan H S, Siguerdidjane H, Petit M, et al. Performance enhancement and robustness assessment of VSC-HVDC transmission systems controllers under uncertainties[J]. *Electrical Power & Energy Systems*, 2012, 35(1): 34-46.
- [9] Årdal A R. Feasibility studies on integrating offshore wind power with oil platforms[D]. Norway: Norwegian University of science and technology, 2011.
- [10] 李爽, 王志新, 王国强, 等. 三电平海上风电柔性直流输电变流器的 PID 神经网络滑模控制[J]. *电机工程学报*, 2012, 32(4): 20-28.
LI Shuang, WANG Zhixin, WANG Guoqiang, et al. PID Neural Network Sliding-mode Controller for Three-level Offshore Wind Power VSC-HVDC Converter[J]. *Proceedings of the CSEE* 2012, 32(4): 20-28.
- [11] 陈海荣. 交流系统故障时 VSC-HVDC 系统的控制与保护策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [12] Durrant M, Werner H, Abbott K. Synthesis of multi-objective controllers for a VSC HVDC terminal using LMIs[C]// *Proceedings of the 43rd IEEE Conference on decision and control*, December 14-17, 2004, Nassua, Piscataway: IEEE Control systems society, 2004: 4473-4478.
- [13] Ruan S Y, Li G J, Jiao X H, et al. Adaptive control design for VSC-HVDC systems based on backstepping method[J]. *Electric Power Systems Research*, 2007, 77(5/6): 559-565.
- [14] Wai R J, Lee J D. Backstepping-based levitation control design for linear maglev rail system[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2008, 2(1): 72-86.
- [15] Karimi A, Feliachi A. Decentralized adaptive backstepping control of electric power system[J]. *Electric Power Systems Research*, 2008, 78(3): 484-493.
- [16] Kazmi S M R, Goto H, Guo H J, et al. A novel algorithm for fast and efficient speed-sensorless maximum power point tracking in wind energy conversion systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(1): 29-36.
- [17] Xu L, Wang Y. Dynamic modeling and control of dfig based wind turbines under unbalanced network conditions[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(1): 314-323.
- [18] Xu L, Andersen B R, Cartwright P. Vsc transmission operating under unbalanced ac conditions—analysis and control design [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(1): 427-434.
- [19] Astrom K J, Wittenmark B. *Adaptive Control*[M]. New York: Addison-Wesley, 1995.
- [20] 李辉, 赵猛, 赵斌, 等. 双馈风电机组关键传感器的故障诊断方法[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(6): 73-78.
LI Hui, ZHAO Meng, ZHAO Bin, et al. Fault diagnosis methods for key sensors of doubly fed wind turbine[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(6): 73-78.
- [21] Du C Q, Bollen M H, Agneholm E, et al. A new control strategy of a VSC HVDC system for high-quality supply of industrial plants[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, 22(4): 2386-2394.