

双馈风电场柔性高压直流接入下的网侧变换器 改进 Backstepping 控制策略

廖 勇, 王国栋

(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)

摘要: 为了增强风电场柔性直流输电(VSC-HVDC)接入结构的强健性,改善电力系统风电接入点的电能质量和提高电力系统风电接入能力,以双馈感应电机(DFIG)风电场 VSC-HVDC 接入结构为例,针对其电网侧电压源换流器(GSVSC)提出了改进的 Backstepping 控制策略。该策略在充分考虑实际控制运行中可能出现的交直流侧系统参数变动、交流电网电压波动以及其他不确定外界扰动的基础上,引入 sign 函数和有界的集总不确定量于各次递回迭代控制力设计中,以增强 GSVSC 运行控制中应对系统参数变动以及外界不确定扰动的能力。所提控制策略的稳定性依据 Lyapunov 稳定原则进行了推导证明。通过 3 种不同干扰模式下的仿真验证以及与传统双闭环 PI 控制效果的对比分析充分表明所提控制策略是有效的。

关键词: 风电场; 双馈感应电机; 高压直流输电; 电压源换流器; Backstepping; 电能质量

中图分类号: TM 614; TM 72; TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.007

0 引言

随着我国风电场开发规模日益扩大,大规模风电场的稳定接入成为电力系统面临的一个重要问题。风电场采用柔性高压直流输电 VSC-HVDC (Voltage Source Converter-High Voltage Direct Current) 的接入方式^[1-2],相较于传统高压直流晶闸管的在线换流 LCC-HVDC (Line Commutate Converter-High Voltage Direct Current)^[3]的接入方式更适合大规模风电场远距离大功率的运行传输^[4],这使得 VSC-HVDC 方式成为当前关注的热点,世界各国都做了相应的工程探索^[5],而我国的上海南汇风电场 VSC-HVDC 接入是国内首条 VSC-HVDC 示范工程,同时大连跨海 VSC-HVDC 输电重大科技示范工程也处于论证实施过程。

风电场 VSC-HVDC 接入结构是一个多变量的耦合非线性系统,VSC-HVDC 的控制性能直接影响到风电场运行状况和电力系统的潮流分配。对于该接入结构下的控制设计,通常控制风电场侧的电压源换流器 WFVSC (Wind Farm side VSC) 为风电场提供一个恒定的交流电压,使其作为一个松弛节点 (slack point)^[6],收集风电场送出的风电功率;至于电网侧的电压换流器 GSVSC (Grid Side VSC),其首要目标是控制一个稳定的直流链电压^[7],而无功控制部分可以根据实际情况来设定。由于 GSVSC 在整

体系统中起到两方面的作用:一方面,对于 VSC-HVDC 接入结构而言,其直流电压的控制效果直接影响 WFVSC 对风电场公共耦合点 PCC (Point of Common Coupling) 的电压控制效果进而影响整体结构的运行效果;另一方面,对电力系统而言,它是风电进入电力系统的直接接入点,其控制运行效果将直接影响到电力系统风电接点处的电能质量,对于整个电力系统的稳定运行具有不可忽视的影响。因此,本文着力研究和改进 GSVSC 的控制策略,以期能够从 VSC-HVDC 接入结构和电力系统可靠运行 2 个方面来做进一步的改善。

对于 GSVSC 的控制策略,通常是双闭环 PI 调节的矢量控制,该控制结构虽然简单,但是容易受系统参数变动^[8]和外界干扰影响导致控制效果变差,而且目前大多数 VSC-HVDC 工程的 PI 调节器参数多采用试凑法或经验法来选取,在系统调试过程中要求较高的技巧和经验,且得到的调节器不一定能使系统性能达到最优状态^[9]。为了提高控制器应对系统参数变化和外界干扰的能力,文献[8-11]分别从神经网络滑模控制、粒子群、输入输出反馈线性化以及 LMI 结构设计来控制角度来做了相应的改进设计,这些控制策略在一定程度上改善了控制性能,但是有关系统直流侧参数和电网电压的波动影响却尚未考虑。近年来,Backstepping 控制设计技术已经获得了极大关注^[12-16],其中文献[14]针对 VSC-HVDC 提出了一种自适应的 Backstepping 控制策略,但未考虑直流电容参数变动、电网电压波动以及其他不可预测的外部扰动,而这些实际运行中可能发生的情况则会导致控制器运行状态的变化,进而影响到

收稿日期:2013-05-19;修回日期:2013-12-22

基金项目:重庆市科委科技计划项目攻关项目(CSTC2008AB-3047)

Project supported by the Technical Plan Key Project of Chongqing Science and Technology Commission (CSTC2008AB-3047)

整体系统的稳定运行。

本文以双馈感应发电机 DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) 风电场 VSC-HVDC 接入结构为例, 针对 GSVSC 设计了改进 Backstepping 控制策略, 该策略是依据充分考虑交直流侧系统参数变化、电网电压波动和外界不确定干扰的 GSVSC 修正动态方程而设计改进, 并将 sign 函数和有界的集总不确定量引入控制力的迭代设计中。相应的 Lyapunov 函数稳定性证明和 4 种不同干扰情况对比仿真分析, 验证了所提控制策略的有效性。

1 DFIG 风电场 VSC-HVDC 接入电网的数学模型

图 1 为双馈风电场通过 VSC-HVDC 接入电网的结构, 该结构包括双馈风电场、风电场滤波器、WVFS、直流母线、GSVSC、电网侧滤波器以及风电场侧和电网侧的升/降压变压器等部分。

1.1 双馈风力发电机侧模型

假设双馈风力发电机连接无穷大系统, 其电压电流正方向规定按电动机惯例, 定子电压相量与 d 轴重合, 即 $u_{gq}=0$ 。依此定向方式, DFIG 在 dq 同步坐标系下的暂态电压和磁链方程可以整理为 (q 轴超前 d 轴)^[7,17]:

$$\begin{cases} u_w = R_s i_g + \frac{d\psi_g}{dt} + j\omega_w \psi_g \\ u_r = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega_w - \omega_r) \psi_r \\ \psi_g = L_s i_g + L_m i_r \\ \psi_r = L_r i_r + L_m i_g \\ L_s = L_{s\sigma} + L_m \\ L_r = L_{r\sigma} + L_m \end{cases} \quad (1)$$

其中, u_w 、 u_r 分别为定、转子电压空间矢量; ψ_w 、 ψ_r 分别为定、转子磁链空间矢量; i_g 、 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 为风电场电压电角频率; ω_r 为转子电角频率; L_s 、 L_r 分别为定、转子全自感; L_m 为定、转子互感; $L_{s\sigma}$ 、 $L_{r\sigma}$ 分别为定、转子漏感。

1.2 WFSV 模型

WFSV 运行控制中作为一个松弛节点, 控制风

电场 PCC 电压的幅值和相位, 当风电场接入后, WFSV 自动吸收风电场送过来的功率^[20]。WFSV 在 dq 同步坐标系下的暂态数学模型为:

$$\begin{cases} L_w \frac{di_{wd}}{dt} = -R_w i_{wd} + \omega_w L_w i_{wq} - u'_{wd} + u_{wd} \\ L_w \frac{di_{wq}}{dt} = -R_w i_{wq} - \omega_w L_w i_{wd} - u'_{wq} + u_{wq} \end{cases} \quad (2)$$

其中, u_{wd} 、 u_{wq} 分别为风电场母线电压的 d 、 q 轴分量; i_{wd} 、 i_{wq} 分别为 WFSV 交流侧输入电流的 d 、 q 轴分量; u'_{wd} 、 u'_{wq} 分别为 WFSV 交流侧基波电压的 d 、 q 轴分量; R_w 、 L_w 分别为考虑变压器 T_s 和平波电抗的等效电阻和电抗; ω_w 为同步旋转坐标系的角频率, 也是风电场电网的角频率。

1.3 GSVSC 模型^[18]

GSVSC 不仅起到控制直流链电压来保障整个 VSC-HVDC 接入结构的稳定运行的作用; 而且作为风电进入电力系统的直接接入点, 改善风电进入电网的电能质量。GSVSC 在 dq 同步旋转坐标系下的暂态数学模型为:

$$\begin{cases} L_s \frac{di_{sd}}{dt} = -R_s i_{sd} + \omega_s L_s i_{sq} - u'_{sd} + u_{sd} \\ L_s \frac{di_{sq}}{dt} = -R_s i_{sq} - \omega_s L_s i_{sd} - u'_{sq} + u_{sq} \end{cases} \quad (3)$$

其中, u_{sd} 、 u_{sq} 分别为电网电压的 d 、 q 轴分量; i_{sd} 、 i_{sq} 分别为 GSVSC 交流侧输入电流的 d 、 q 轴分量; u'_{sd} 、 u'_{sq} 分别为 GSVSC 交流侧基波电压的 d 、 q 轴分量; R_s 、 L_s 分别为考虑变压器 T_s 和平波电抗的等效电阻和电抗; ω_s 为同步旋转坐标系的角频率, 即电网的角频率。

根据功率平衡的关系, GSVSC 侧直流链动态方程为:

$$\frac{dU_{dk2}}{dt} = \frac{1.5(u_{sd}i_{sd} + u_{sq}i_{sq})}{C_2 U_{dk2}} + \frac{I_{dk2}}{C_2} \quad (4)$$

其中, U_{dk2} 、 I_{dk2} 分别为 GSVSC 直流链电压和电流; C_2 为 GSVSC 直流链的等效电容。

根据数学模型可以得到其相应 GSVSC 的等效电路如图 2 所示。

2 考虑各种干扰的 GSVSC 修正动态方程

实际系统的线路额定阻抗是依据系统短路容量来计算的, 而在系统运行过程中, GSVSC 交流侧输电线路阻抗参数、升压变压器阻抗参数、平波电抗参数

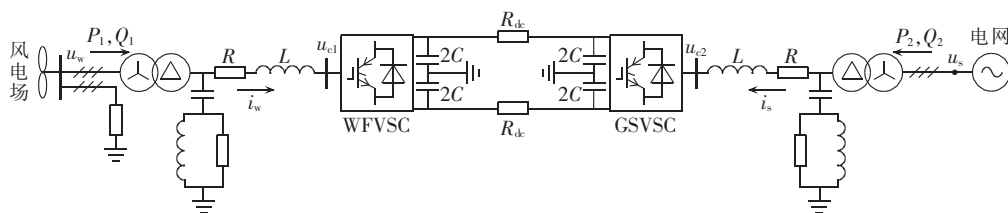


图 1 DFIG 风电场 VSC-HVDC 接入电网示意图

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

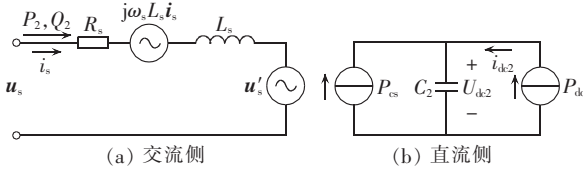


图 2 GSVSC 交直流侧等效电路图

Fig.2 AC- and DC-side equivalent circuits of GSVSC

以及直流侧的电容参数会受温度、磁芯饱和、输电电缆老化和风能间歇性等因素影响而变化^[8],此外电力系统的电压波动和外界不确定扰动同样也会直接影响 GSVSC 的控制性能。因此为了充分考虑这些干扰因素,需要对 GSVSC 的动态方程做进一步的修正。

首先将 GSVSC 的动态方程式(3)重新整理为:

$$\dot{\mathbf{M}}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{x} = \mathbf{G}_s \mathbf{v} + \mathbf{u} \quad (5)$$

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T = [\dot{i}_{sd} \ \dot{i}_{sq}]^T, \quad \mathbf{u} = [u_1 \ u_2]^T = [u_{sd} \ u_{sq}]^T$$

$$\mathbf{v} = [v_1 \ v_2]^T = [u'_{sd} \ u'_{sq}]^T, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \bar{L}_s & 0 \\ 0 & \bar{L}_s \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \bar{R}_s & -\omega_s \bar{L}_s \\ \omega_s \bar{L}_s & \bar{R}_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_s = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

其中, $\bar{R}_s$ 、 $\bar{L}_s$ 、 $\bar{u}_{sd}$ 和 $\bar{u}_{sq}$ 分别代表 R_s 、 L_s 、 u_{sd} 和 u_{sq} 的额定值。

引入系统参数的变化和其他外部干扰因素,得到新的动态方程为:

$$(\mathbf{M} + \Delta\mathbf{M})\dot{\mathbf{x}} + (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B})\mathbf{x} = \mathbf{G}_s \mathbf{v} + (\bar{\mathbf{u}} + \Delta\mathbf{u}) - \mathbf{f}_0 \quad (6)$$

其中, $\mathbf{f}_0$ 为其他外部扰动量, $\Delta\mathbf{u} = [\Delta u_{sd} \ \Delta u_{sq}]^T$ 为电

网电压幅值的变化量, $\Delta\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \Delta\bar{L}_s & 0 \\ 0 & \Delta\bar{L}_s \end{bmatrix}$ 和 $\Delta\mathbf{B} =$

$\begin{bmatrix} \Delta\bar{R}_s & -\omega_s \Delta\bar{L}_s \\ \omega_s \Delta\bar{L}_s & \Delta\bar{R}_s \end{bmatrix}$ 为系统参数的变化量。

定义 $\mathbf{l}_v = \Delta\mathbf{M}\dot{\mathbf{x}} + \Delta\mathbf{B}\mathbf{x} - \Delta\mathbf{u} + \mathbf{f}_0$ 为 GSVSC 交流侧集总不确定量,且 $\|\mathbf{l}_v\| < \rho_s, \rho_s$ 为给定的正常数。重新整理方程式(6)得到考虑系统参数变化以及其他外界干扰因素下的新的 GSVSC 的动态方程式:

$$\dot{\mathbf{x}} = -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{x} - \mathbf{M}^{-1}\mathbf{l}_v + \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{G}_s \mathbf{v} + \mathbf{u}) \quad (7)$$

同样,为考虑电容参数变化对 GSVSC 控制器设计的影响,对于 GSVSC 的直流侧动态方程式(4)作同样的整理,得到新的直流侧动态方程:

$$\dot{x}_3 = \frac{1.5\bar{u}_{sd}}{\bar{C}_2 x_3} x_1 + \frac{1.5\bar{u}_{sq}}{\bar{C}_2 x_3} x_2 + l_{dc} \quad (8)$$

其中, $x_3 = U_{dk2}$; $\bar{C}_2$ 为直流电容额定参数, ΔC_2 是其参数波动量;定义 GSVSC 直流侧集总不确定量为 $l_{dc} = (1.5\bar{i}_{sd}\Delta u_{sd}/x_3 + 1.5\bar{i}_{sq}\Delta u_{sq}/x_3 + l_{dc2} + f_{dc} - \Delta C_2 \dot{x}_3)/\bar{C}_2$,其中 f_{dc} 为外界扰动量。

3 GSVSC 的改进 Backstepping 控制策略

由于 DFIG 风电场 VSC-HVDC 接入方式具有其独特性,这使得 GSVSC 的控制目标设计上会与传统链接 2 个独立系统的 VSC-HVDC 的控制目标不同。通常一个 VSC 可以独立解耦地控制其有功和无功的输出,本文从提高 DFIG 风电场 VSC-HVDC 接入结构的强健性和最大利用变换器工作能力的角度出发,选取的控制目标分别为稳定直流电压 U_{dk2} 和变换器单位功率因数运行。

为了实现 GSVSC 的有功、无功的控制解耦,选取电网电压定向的 dq 同步坐标轴系,相应的电网电压 d 、 q 轴分量为:

$$\begin{cases} \bar{u}_{sd} = U_s \\ \bar{u}_{sq} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\bar{u}_{sd}$ 、 $\bar{u}_{sq}$ 分别为额定电网电压的 d 、 q 轴分量; U_s 为电网电压的额定幅值。

定义直流电压控制误差: $e_{dc} = x_{3ref} - x_3$,其中 x_{3ref} 为直流电压的给定参考值,设计第 1 个的 Lyapunov 函数为 $V_1 = e_{dc}^2/2$,结合式(8)和(9)得到 V_1 微分表达式:

$$\dot{V}_1 = e_{dc} \dot{e}_{dc} = e_{dc} \left(\dot{x}_{3ref} - \frac{1.5\bar{u}_{sd}}{\bar{C}_2 x_3} x_1 - l_{dc} \right) \quad (10)$$

选取 $\mathbf{x}$ 为虚拟控制力,定义它的控制偏差为 $\mathbf{e}_s = [e_{sd} \ e_{sq}]^T = \boldsymbol{\alpha} - \mathbf{x}$,其中 $\boldsymbol{\alpha} = [x_{1ref} \ x_{2ref}]^T$, x_{1ref} 和 x_{2ref} 分别为各自的控制给定。如果设计 x_{1ref} 为:

$$x_{1ref} = \frac{\bar{C}_2 x_3}{1.5\bar{u}_{sd}} [\dot{x}_{3ref} + k_0 e_{dc} + \rho_{dc} \text{sgn}(e_{dc})] \quad (11)$$

其中, k_0 是正常数; $\text{sgn}(\cdot)$ 是 sign 函数。

用所设计的 x_{1ref} 重新表达式(10)并整理为:

$$\dot{V}_1 \leq -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_0 \mathbf{e} + \mathbf{e}_s^T \mathbf{C} \mathbf{e} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{e} = [e_{dc} \ 0]^T$, $\mathbf{K}_0 = \begin{bmatrix} k_0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T$, $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{1.5\bar{u}_{sd}}{\bar{C}_2 x_3} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ 。

由于本文选取 GSVSC 单位功率因数运行来充分利用变换器性能,相应设计 $x_{2ref} = 0$ 。

这样,结合式(7)可以得到虚拟控制力的控制偏差 $\mathbf{e}_s$ 的微分表达式为:

$$\dot{\mathbf{e}}_s = \dot{\boldsymbol{\alpha}} - \dot{\mathbf{x}} = \dot{\boldsymbol{\alpha}} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{x} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{l}_v - \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{G}_s \mathbf{v} + \mathbf{u}) \quad (13)$$

设计第 2 个 Lyapunov 函数为 $V_2 = V_1 + \mathbf{e}_s^T \mathbf{M} \mathbf{e}_s/2$,结合式(12)和(13)可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + \mathbf{e}_s^T \dot{\mathbf{M}} \mathbf{e}_s/2 + \mathbf{e}_s^T \dot{\mathbf{M}} \mathbf{e}_s \leq -\mathbf{e}^T \mathbf{K}_0 \mathbf{e} + \mathbf{e}_s^T \mathbf{C} \mathbf{e} + \\ &\mathbf{e}_s^T \mathbf{M} [\dot{\boldsymbol{\alpha}} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{x} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{l}_v - \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{G}_s \mathbf{v} + \mathbf{u})] \leq \\ &-\mathbf{e}^T \mathbf{K}_0 \mathbf{e} + \mathbf{e}_s^T \mathbf{C} \mathbf{e} + \mathbf{e}_s^T (\mathbf{M} \dot{\boldsymbol{\alpha}} + \mathbf{B}\mathbf{x} + \mathbf{l}_v - \mathbf{G}_s \mathbf{v} - \mathbf{u}) \end{aligned} \quad (14)$$

根据式(14),依据 Backstepping 控制规则设计

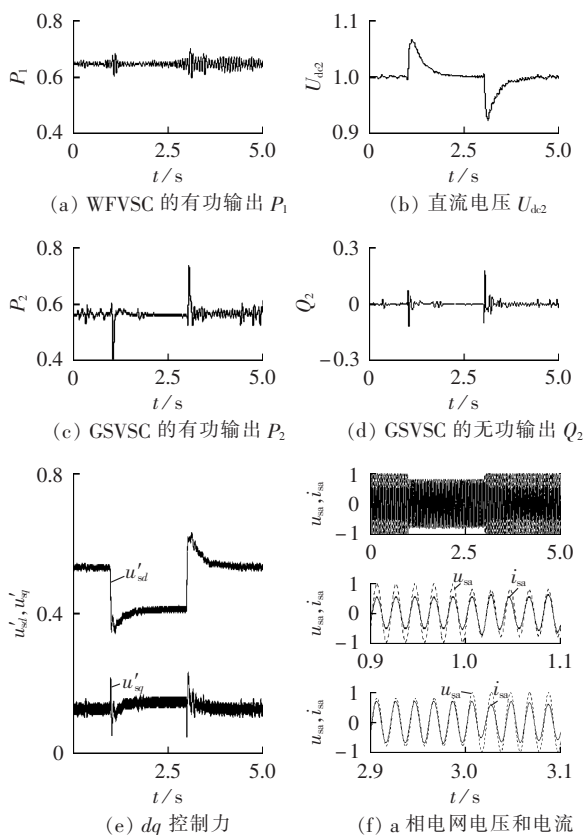


图 4 干扰模式 1 下的 PI 控制仿真结果

Fig.4 Simulative results of PI control for disturbance mode 1

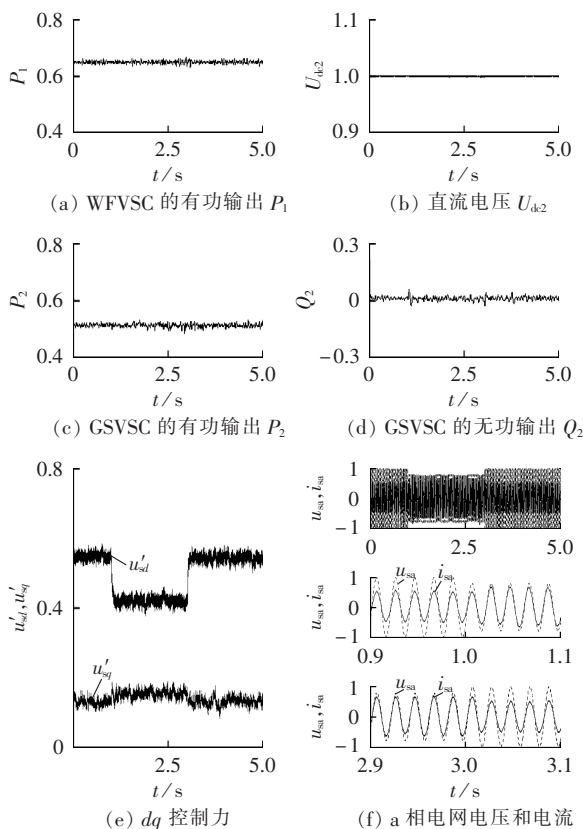


图 5 干扰模式 1 下的 Backstepping 控制仿真结果

Fig.5 Simulative results of Backstepping control for disturbance mode 1

能够很好地应对电网电压变动的干扰,从图 5(b)—(d)可以看出,所提控制策略在直流母线电压控制、GSVSC 的有功和无功控制方面都有很好的表现,图 5(f)给出的电网侧 a 相电压、电流的相位情况也说明了所提控制策略对于改善电网侧电能质量的贡献。

4.3 干扰模式 2 下的对比仿真及分析讨论

图 6 和图 7 分别为 GSVSC 采用传统双闭环 PI 控制策略和本文提出的改进 Backstepping 控制策略在系统交、直流参数出现变动下的对比仿真结果。从仿真过程来看,在风电场风速一定($v_{wind} = 11 \text{ m/s}$)的情况下,如果系统交流阻抗参数和直流电容参数出现变动后,对比图 6 和图 4 可见,在稳态运行下,

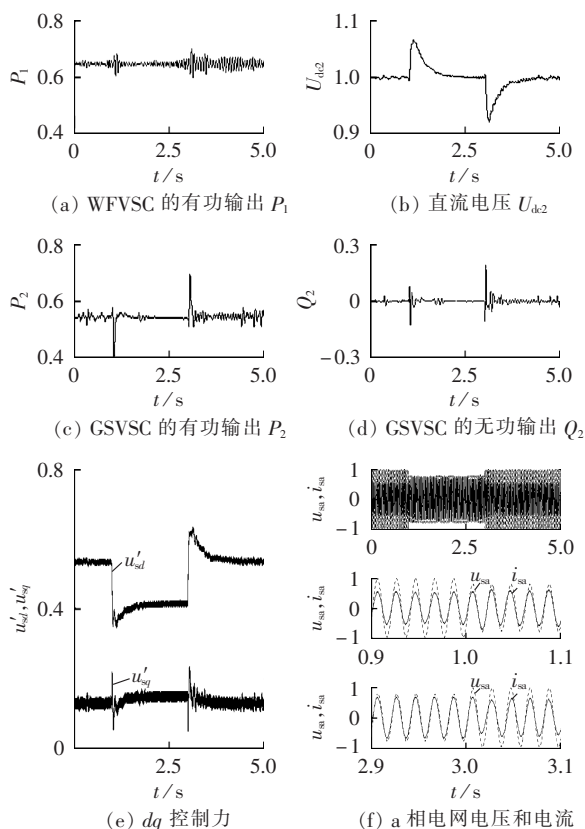
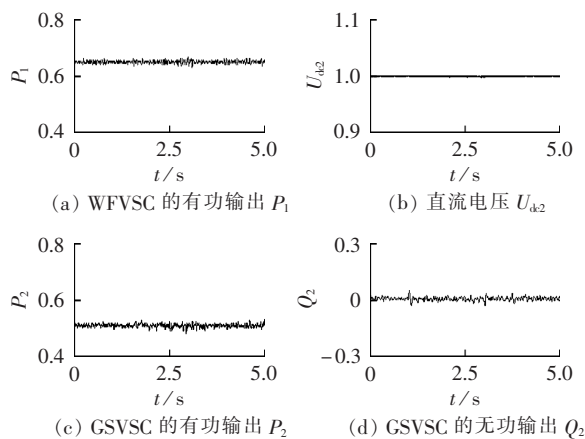


图 6 干扰模式 2 下的 PI 控制仿真结果

Fig.6 Simulative results of PI control for disturbance mode 2



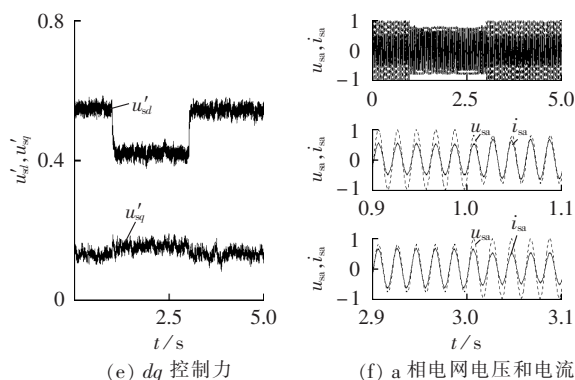


图7 干扰模式2下的Backstepping控制仿真结果

Fig.7 Simulative results of Backstepping control for disturbance mode 2

系统参数的变动会引起直流母线电压、GSVSC的有功和无功出现一定幅度的抖动,而同样在电网电压变动过程中,系统控制的过渡过程非常明显,这些都说明PI控制策略容易受参数及系统工作状态而不能达到最优的控制效果。而从图7的仿真结果来看,本文所提出的改进Backstepping控制策略能够很好地应对系统参数的变动,保障直流母线电压控制、GSVSC的有功和无功控制的平稳控制效果,改善电力系统风电接入点的电能质量。

4.4 干扰模式3下的对比仿真及分析讨论

图8和图9分别为GSVSC采用传统双闭环PI

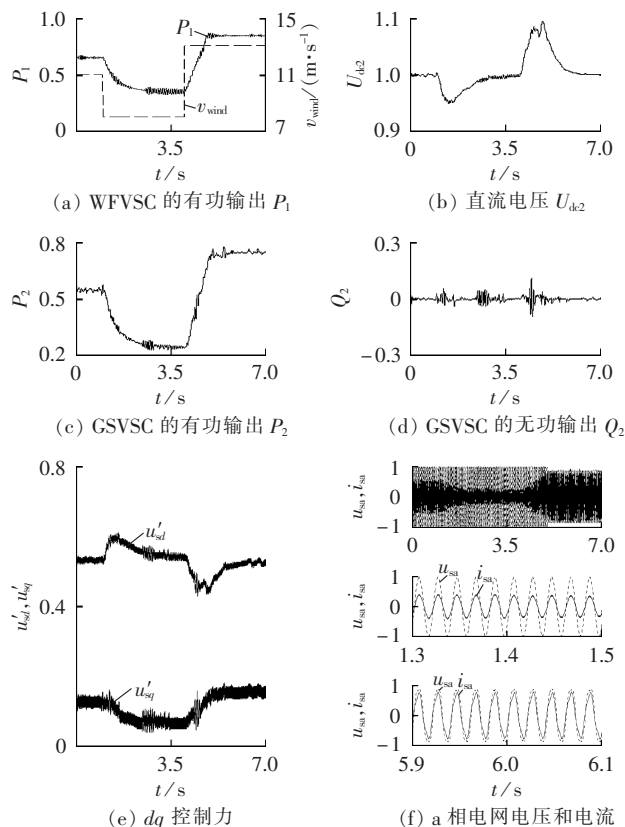


图8 干扰模式3下的PI控制仿真结果

Fig.8 Simulative results of PI control for disturbance mode 3

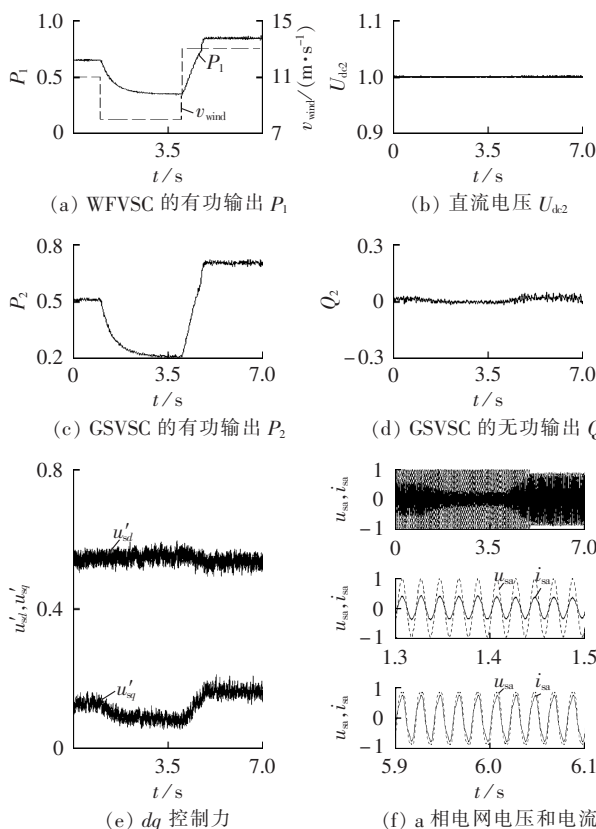


图9 干扰模式3下的Backstepping控制仿真结果

Fig.9 Simulative results of Backstepping control for disturbance mode 3

控制策略和采用本文提出的改进Backstepping控制策略在风电场风速变动以及电网出现谐波干扰情况下的对比仿真结果。从图8(b)~(d)可以看出在风电场风速变动以及电网出现谐波干扰的情况下,传统PI控制会出现不同程度的过渡过程,从而使得直流母线电压、GSVSC的有功和无功控制效果变差;从图8(a)可以看到WfVSC输入到直流系统的有功由于直流母线电压控制的波动而出现有功的波动,这说明GSVSC的控制性能也间接影响到WfVSC的控制性能。而从图9(b)~(d)可以看出,本文所提出的改进Backstepping控制策略依旧能够很好地应对风电场风速的变动以及外界电网电压的不确定干扰影响,直流母线电压、GSVSC的有功和无功依旧可以达到令人满意的控制效果。此外,从图9(a)也可以看到,WfVSC输入到直流系统的有功相较于图8(a)更加平滑和稳定,这也是GSVSC控制效果改善的印证。

5 结论

本文从DFIG风电场VSC-HVDC接入系统的结构出发,在充分考虑了系统参数变动以及外界不确定干扰因素的影响的基础上,提出了改进的GSVSC的动态修正模型并依此设计了改进Backstepping控制策略,通过一系列的仿真对比分析充分表明:所提

控制策略能够得到更加稳定可控的直流电压,系统两端的功率流动也更加平滑稳定,整个系统应对系统参数和外界扰动的运行控制能力更强。这说明改进控制后的 DFIG 风电场 VSC-HVDC 接入结构更具强健性和稳定性。此外,电网侧电压电流的控制效果也表明所提控制策略能够改善电力系统风电接入点的电能质量,提高整个电力系统的风电接入能力。

参考文献:

- [1] 孙世贤,田杰. 提升直流并网风电故障穿越能力的新方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):137-141.
SUN Shixian,TIAN Jie. Enhancement of fault ride-through capability for grid-connected wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):137-141.
- [2] 韦延方,卫志农,孙国强,等. 一种新型的高压直流输电技术——MMC-HVDC[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):1-9.
WEI Yanfang,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. New HVDC power transmission technology:MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):1-9.
- [3] 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.
- [4] 常勇,徐政,郑玉平. 大型风电场接入系统方式的仿真比较[J]. 电力系统自动化,2007,31(14):70-75.
CHANG Yong,XU Zheng,ZHENG Yuping. A comparison of the integration types of large wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(14):70-75.
- [5] NIKOLAS F,AGELIDIS V G. VSC-based HVDC power transmission systems:an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2009,24(3):592-602.
- [6] FELTES C,WREDE H,KOCH F,et al. Enhanced fault ride-through method for wind farms connected to the grid through VSC-based HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(3):1537-1546.
- [7] XU L,YAO L,SASSE C. Grid integration of large DFIG-based wind farms using VSC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(3):976-984.
- [8] 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]. 中国电机工程学报,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.
- [9] 王国强,王志新. 粒子群与 PIDNN 控制器在 VSC-HVDC 中的应用[J]. 中国电机工程学报,2011,31(3):8-13.
WANG Guoqiang,WANG Zhixin. Application of PSO and PIDNN controller for VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(3):8-13.
- [10] 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.
CHEN Hairong. Control and protection of VSC based HVDC system under AC system fault conditions[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2007.
- [11] DURRANT M,WERNER H,ABBOTT K. Synthesis of multi-objective controllers for a VSC HVDC terminal using LMIs[C]//3rd IEEE Conference on Decision and Control. Atlantis,Bahamas: IEEE Conference Publications,2004:4473-4478.
- [12] MORAWIEC M. The adaptive backstepping control of permanent magnet synchronous motor supplied by current source inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2013,9(2):1047-1055.
- [13] WAI R,CHUANG K L. Design of backstepping particle-swarm-optimization control for maglev transportation system[J]. IET Control Theory,2010,4(4):625-645.
- [14] RUAN S,LI G,JIAO X,et al. Adaptive control design for VSC-HVDC systems based on backstepping method[J]. Electric Power Systems Research,2007,77(6):559-565.
- [15] MAZENC F,ITO H. Lyapunov technique and backstepping for nonlinear neutral systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,2013,58(2):512-517.
- [16] WAI R,LIN C Y,WU W C. Design of backstepping control for high-performance inverter with stand-alone and grid-connected power-supply modes[J]. IET Power Electronics,2013,6(4):752-762.
- [17] 李国庆,王鹤,李鸿鹏. 微电网中双馈感应风力发电系统控制方法研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):1-7.
LI Guoqing,WANG He,LI Hongpeng. Control strategy for DFIG-based wind farm in microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(10):1-7.
- [18] XU L,ANDERSEN B R. VSC transmission operating under unbalanced AC conditions—analysis and control design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(1):427-434.
- [19] 廖勇,王国栋. 双馈风电场的柔性高压直流输电系统控制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(28):7-15.
LIAO Yong,WANG Guodong. VSC-HVDC system control for grid-connection of DFIG wind farms[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(28):7-15.
- [20] FELTES C,WREDE H,FRIEDRICH W K,et al. Enhanced fault ride-through method for wind farms connected to the grid through VSC-based HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(3):1537-1546.
- [21] ANDERSEN B R,XU L,HORTON P,et al. Topologies for VSC transmission[J]. Power Engineer,2002,16(3):142-150.
- [22] DU Chuiqing. VSC-HVDC for industrial power systems[D]. Goteborg,Sweden:Chalmers University of Technology,2007.

作者简介:



廖勇

廖勇(1964—),男,四川营山人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电机运行与控制的教学和科研工作(E-mail:yongliaocqu@cta.cq.cn);

王国栋(1984—),男,山西大同人,博士,主要从事柔性高压直流输电系统的运行控制及其在新能源发电中的应用的研究

(E-mail:wgdonline@163.com)。

(下转第47页 continued on page 47)

电力自动化设备,2011,31(11):51-55.

YANG Yong,ZHAO Chunjiang. Proportional resonance controller of grid-connected inverter for distributed generation system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(11): 51-55.

[14] ZMOOD D N,HOLMES D G,BODE G H. Frequency-domain analysis of three-phase linear current regulators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2001,37(2):601-610.

[15] 张兴,曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M]. 北京:机械工业出版社,2010:186-190.

作者简介:



孟建辉

孟建辉(1987-),男,河南扶沟人,博士研究生,研究方向为电力电子技术、新能源发电与电力系统(E-mail:mengjianhui2008@163.com);

石新春(1950-),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,研究方向为新型功率变换技术、现代电能质量、高频电源技术、SVC 及光伏并网发电技术。

Optimal control of photovoltaic grid-connected current based on PR control

MENG Jianhui¹,SHI Xinchun¹,FU Chao¹,WANG Yi¹,LI Peng¹,WEI Debing²

- (1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University,Baoding 071003,China;
2. Baoding Sifang Sanyi Electric Co.,Ltd.,Baoding 071051,China)

Abstract: When the single-phase photovoltaic grid-connected inverter with H6 topology applies conventional PI controller to track the sinusoidal reference current,the steady-state error will be generated and its anti-interference capability becomes poor ,for which ,an overall control strategy based on PR (Proportional Resonant) control is proposed. The fundamentals of PR controller are introduced,the influence of its control parameters on system property is analyzed and the engineering design principles of its application in the photovoltaic grid-connected inverter with H6 topology are given. The simulation model and experimental prototype of single-phase photovoltaic grid-connected inverter system are built to verify the theoretical analysis and results indicate that,the static-error-free control of grid-connected current is realized,the phase error introduced by PI controller is eliminated and the excellent grid-connected waveform is achieved.

Key words: photovoltaic grid-connection; electric inverters; H6 topology; PR control; static-error-free control; electric current control

(上接第 41 页 continued from page 41)

Improved Backstepping control strategy for GSVSC of DFIG wind farm with VSC-HVDC grid-integration

LIAO Yong,WANG Guodong

- (State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University,Chongqing 400044,China)

Abstract: An improved Backstepping control strategy of GSVSC (Grid-Side Voltage-Source Converter) is proposed for DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) wind farm with the grid-integration structure of VSC-HVDC(Voltage Source Converter-High Voltage Direct Current) to improve its grid-integration robustness, the electrical energy quality of its integration point and its grid-integration capability. With full consideration of the parameter variations at both AC and DC sides,the AC voltage fluctuation and other uncertainties, sign function and bounded lumped uncertainties are introduced to the control force design for each iterative turn to improve the anti-disturbance performance of GSVSC. The stability of the proposed control strategy is deduced according to Lyapunov principle. Simulative results of three disturbance modes are compared with those by traditional double-loop PI control strategy under same conditions,which proves the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: wind farms; doubly-fed induction generator; HVDC power transmission; voltage-source converter; Backstepping; power quality