

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.05.014

经 VSC-HVDC 系统并网的风电场反馈线性化滑模控制

鲁裕婷¹, 都洪基¹, 朱鑫要²

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:以减少风电场并网对电网的影响及提高并网系统鲁棒性为目的,采用基于反馈精确线性化的滑模变结构控制策略对经高压直流输电并网的风电场系统两侧换流站的控制进行设计。首先建立电压源换流器在 dq 坐标系下的数学模型,然后采用基于精确线性化解耦的滑模变结构控制方法设计高压直流输电系统两侧换流站,解决传统双闭环控制方法调节能力差以及参数整定困难等问题,进一步提高控制系统的抗干扰能力与动态稳定性,最后在 Matlab/Simulink 中建立经高压直流输电系统并网的风电场仿真模型,对比加入滑模变结构前后的仿真波形图,验证控制系统的各方面性能。

关键词:风电场并网;高压直流输电系统;换流站控制;精确化线性解耦;滑模变结构

中图分类号:TM72

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)05-0091-07

0 引言

随着电压源换流器(voltage source converter, VSC)的快速发展,基于 VSC 的高压直流输电(VSC-high voltage direct current, VSC-HVDC)系统在直流输电中应用广泛^[1-3]。而经 VSC-HVDC 并网的风电场系统换流站的控制方式能够对整个系统的运行性能造成较大影响^[4-6],因此需对经 VSC-HVDC 并网的风电场系统换流站控制策略进行研究。

文献[7]为提高系统鲁棒性,在整流侧的电压外环控制增加一个预测信号输入到电流内环,逆变侧将系统电压和直流电流的信号引入到前馈控制;文献[8]在外环控制中采用模糊神经网络控制模型,并用遗传算法对控制器参数进行优化,克服 PI 控制的缺陷,但是算法的计算时间较长;文献[9]设计两端 VSC-HVDC 系统的 PI 双闭环和无源双闭环 2 种控制器,实现电压、电流的快速精准控制;文献[10]在建立风电场并联 VSC-HVDC 控制系统的欧拉-拉格朗日系统(Euler-Lagrange, EL)数学模型,进而提出输电系统两侧换流站的无源控制策略,但该控制系统的计算量庞大;文献[11]在多端柔性直流输电系统中建立变流站仿射非线性数学模型,采用滑模变结构控制方法设计变流站自身控制器,使得系统具有良好的动态性能。

文中为克服 PI 控制的缺陷,引入反馈线性化控制将 HVDC 的非线性系统控制问题转换为线性系统的控制问题,实现较大区域的系统线性化,扩大

调节范围。而滑模变结构控制方式对于电网出现故障或受到干扰这些情况具有保持参数不变的性能,适用于线性和非线性系统。因此,在反馈线性化解耦控制策略的基础上加入滑模变结构控制环节,可以使风电场高压直流系统具有更强的鲁棒性。

因此,文中采用基于精确线性化解耦的滑模变结构控制方法设计经 VSC-HVDC 并网的风电场系统两侧换流站的控制方法,在 Matlab/Simulink 平台建立风电场并网 VSC-HVDC 系统的仿真模型,通过仿真验证所设计控制策略能够减少风电场并网对电网稳定性的影响,进一步提高控制系统的动态稳定性与鲁棒性。

1 风电场并网系统结构及 VSC 数学模型

风电场集中式并网 VSC-HVDC 系统的原理结构如图 1 所示。并网系统主要由风电场侧换流站(wind farm VSC, WFVSC)、电网侧换流站(grid side VSC, GSVSC)以及直流输电线路组成^[12]。

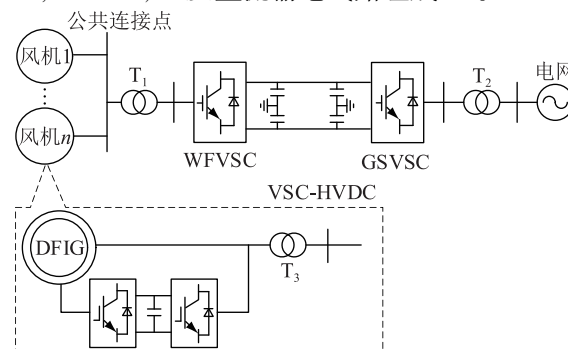


图 1 经 VSC-HVDC 并网的风电场系统结构

Fig.1 Structural diagram of wind farm grid-connected system via VSC-HVDC

收稿日期:2019-04-17;修回日期:2019-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607092)

目前,很多文献对 VSC 进行了数学建模,VSC 在 dq 坐标下的数学模型可进一步简化为^[13-16]:

$$\begin{cases} u_{cd} = u_{sd} - Ri_d - L \frac{di_d}{dt} - Xi_q \\ u_{cq} = -Ri_q - L \frac{di_q}{dt} + Xi_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_d, i_q 分别为 VSC 交流侧电流的 d 轴和 q 轴分量; u_{sd}, u_{sq} 分别为 VSC 交流侧三相电压的 d 轴和 q 轴分量; ω 为交流电网的基波角频率, $\omega L = X$, R 和 L 分别为换流站、交流线路以及变压器的等效电阻和电感; u_c 为连接换流站交流侧母线电压。交流电网与 VSC 交换的有功功率 P_s 和无功功率 Q_s 为:

$$\begin{cases} P_s = 3u_{sd}i_d/2 \\ Q_s = 3u_{sq}i_q/2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, i_d 决定有功功率, i_q 决定无功功率,通过对 i_d 和 i_q 进行独立控制,能够独立解耦控制交流电网流入 VSC 的有功功率和无功功率。

2 VSC-HVDC 系统两侧换流站的控制策略

滑模控制可以提高非线性系统的鲁棒性,所控制的系统结构是可变的,能够实现动态调节,又称为滑动模态控制。基本原理是控制系统的状态轨迹使其在有限的时间段里运动到给定的切换轨迹上,再按照切换轨迹运动至平衡点。当系统进入滑模状态后,控制系统的参数不会受外界扰动的影响。因此文中在反馈精确线性化控制的基础上增加滑模变结构控制,能够进一步改善系统动态性能,提高系统鲁棒性。

2.1 WFVSC 反馈精确线性化滑模变结构控制策略

2.1.1 WFVSC 反馈精确线性化控制

WFVSC 的主要控制目标是实现有功功率和无功功率的解耦控制以及抑制风电场并联公共点 (point of common coupling, PCC^[17]) 传输功率的波动。因此,WFVSC 采用定有功功率控制策略和定无功功率控制策略,通过 i_{d1} 控制有功功率,通过 i_{q1} 控制无功功率。首先采用反馈线性化理论实现 WFVSC 控制系统的完全线性化和交换功率的独立解耦控制。

在反馈线性化理论中,一个单输入单输出和多输入多输出的非线性系统函数如式(3)和式(4)所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{H}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $h(\mathbf{x})$ 为光滑的标量函数; $f(\mathbf{x})$ 和 $g(\mathbf{x})$ 为光滑的向量场; \mathbf{x} 为状态向量; \mathbf{u} 为控制输入向量; \mathbf{y} 为输出向量; $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 为由列向量 $f(\mathbf{x})$ 组成的矩阵; $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ 为由列向量 $g(\mathbf{x})$ 组成的矩阵; $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ 为由函数 $h(\mathbf{x})$ 组成的矩阵。

将 VSC 在 dq 坐标系下的数学模型写成非线性系统的形式,其中, i_L 表示直流线路电流,如式(5)和式(6)所示。

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_{d1} \\ \dot{i}_{q1} \\ \dot{i}_{dc1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L}i_{d1} + \omega i_{q1} \\ -\frac{R}{L}i_{q1} - \omega i_{d1} \\ \frac{3}{2Cu_{dc1}}(u_{sd1}i_{d1} + u_{sq1}i_{q1}) + \frac{i_{L1}}{C} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_1} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{sd1} - u_{cd1} \\ u_{sq1} - u_{cq1} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{cases} y_1 = h_1(\mathbf{x}) = i_{d1} \\ y_2 = h_2(\mathbf{x}) = i_{q1} \end{cases} \quad (6)$$

该非线性系统的对应关系 $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 为:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1(\mathbf{x}) \\ \mathbf{f}_2(\mathbf{x}) \\ \mathbf{f}_3(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1}x_1 + \omega x_2 \\ -\frac{R_1}{L_1}x_2 - \omega x_1 \\ \frac{3u_{sd1}}{2C_1x_3}(u_{sd1}i_{d1} + u_{sq1}i_{q1}) + \frac{i_{L1}}{C_1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

针对式(5)的换流站数学模型,确立状态量、输入量和输出量,如表 1 所示。

表 1 风电场侧非线性系统的向量说明
Table 1 Vector description of nonlinear system on wind farm side

向量名	具体解释
控制输入向量 \mathbf{u}	$u_1 = u_{sd1} - u_{cd1}, u_2 = u_{sq1} - u_{cq1} = -u_{cq1}$
状态向量 \mathbf{x}	$x_1 = i_{d1}, x_2 = i_{q1}, x_3 = i_{dc1}$
输出向量 \mathbf{y}	$y_1 = h_1(\mathbf{x}) = i_{d1}, y_2 = h_2(\mathbf{x}) = i_{q1}$
光滑向量场 \mathbf{G}	$\mathbf{g}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_1} \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{g}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_1} \end{bmatrix}, \mathbf{g}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

分别对 y_1 和 y_2 求导使得输出变量公式中出现输入向量,得:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -\frac{R_1}{L_1}x_2 + \omega x_3 - \frac{u_1}{L_1} \\ \dot{y}_2 = -\frac{R_2}{L_2}x_3 - \omega x_2 - \frac{u_2}{L_2} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可得, y_1 和 y_2 的关系度都是 1, 则有如下表达式成立:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_1(\mathbf{x}) + \mathbf{E}_1(\mathbf{x}) \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中,

$$\mathbf{A}_1(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1}x_2 + \omega x_3 \\ \frac{R_1}{L_1}x_3 - \omega x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}(\mathbf{x}) \\ A_{12}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{E}_1(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

系统的控制律为:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \mathbf{E}_1^{-1}(\mathbf{x}) \left(-\mathbf{A}_1(\mathbf{x}) + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \right) \quad (12)$$

将式(9)和式(12)联立得:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

v_1 与 v_2 根据有界跟踪理论来进行确定, 定义 2 个误差向量, $e_1 = y_1^* - y_1$, $e_2 = y_2^* - y_2$ 。为了减小系统参数变化引起的静态误差, 在 v_1 与 v_2 的计算公式中加入积分环节, 如下所示:

$$v_1 = y_1^* + K_{p1}e_1 + K_{i1} \int e_1 dt \quad (14)$$

$$v_2 = y_2^* + K_{p2}e_2 + K_{i2} \int e_2 dt \quad (15)$$

式(14)与式(15)中各个系数的具体数值由如下所示误差分析方程求得:

$$\ddot{e}_2 + K_{p1}\dot{e}_1 + K_{i1}e_1 = 0 \quad (16)$$

$$\ddot{e}_2 + K_{p2}\dot{e}_2 + K_{i2}e_2 = 0 \quad (17)$$

误差分析公式中的系数均由方程的极点在左平面这个定理得出。在式(17)中, 当 $t \rightarrow \infty$, $e \rightarrow 0$ 时, 将式(14)和式(15)代入到式(13)中, 得:

$$\begin{cases} u_1 = R_1x_2 - \omega L_1x_3 + L_1v_1 \\ u_2 = R_2x_3 + \omega L_2x_2 + L_2v_2 \end{cases} \quad (18)$$

将有功功率与无功功率的参考值与实际值比较后经 PI 调节得出 i_{d1}^* 和 i_{q1}^* 。其中, 将双馈风机发出的功率输入至 WFVSC 的定有功功率控制模块中作为有功参考值, 实现最大风能捕获。 i_{d1}^* 和 i_{q1}^* 表

达式如下:

$$\begin{cases} i_{d1}^* = \frac{2P_1^*}{3u_{s1}} \\ i_{q1}^* = \frac{2Q_1^*}{3u_{s1}} \end{cases} \quad (19)$$

首先将这 2 个变量输入低通滤波器, i_{d1}^* 和 y_1^* 与 i_{q1}^* 和 y_2^* 之间的关系式分别为:

$$\frac{y_1^*(s)}{i_{d1}^*(s)} = \frac{K_{11}}{s^2 + K_{12}s + K_{11}} \quad (20)$$

$$\frac{y_2^*(s)}{i_{q1}^*(s)} = \frac{K_{21}}{s^2 + K_{22}s + K_{21}} \quad (21)$$

其中, K_{11} , K_{12} , K_{21} 和 K_{22} 为滤波器参数, 调整这些参数的数值从而提高 y_1^* 对 i_{d1}^* 和 y_2^* 对 i_{q1}^* 的跟踪性能以及准确度。

2.1.2 反馈精确线性化滑模变结构控制

在上述理论的基础上, 加入滑模变结构控制设计, 使得有功分量电流的实际值 i_{d1} 尽可能接近其参考值 i_{d1}^* , 控制无功功率的无功分量电流的实际值 i_{q1} 尽可能趋近其参考值 i_{q1}^* , 滑模函数设置为:

$$\begin{cases} s_1(x) = y_1 - y_1^* = i_{d1} - i_{d1}^* \\ s_2(x) = y_2 - y_2^* = i_{q1} - i_{q1}^* \end{cases} \quad (22)$$

根据指数控制律的公式:

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -k_1s_1 - \varepsilon_1 \text{sgn}s_1 \\ \dot{s}_2 = -k_2s_2 - \varepsilon_2 \text{sgn}s_2 \end{cases} \quad (23)$$

计算得滑模变结构的控制律为:

$$\begin{cases} v_1 = -k_1(i_{d1} - i_{d1}^*) - \varepsilon_1 \text{sgn}(i_{d1} - i_{d1}^*) \\ v_2 = -k_2(i_{q1} - i_{q1}^*) - \varepsilon_2 \text{sgn}(i_{q1} - i_{q1}^*) \end{cases} \quad (24)$$

系统的控制量为:

$$\begin{cases} u_1 = -R_1x_1 + \omega x_2L_1 + L_1v_1 \\ u_2 = -R_2x_2 - \omega x_1L_2 + L_2v_2 \end{cases} \quad (25)$$

控制系统原理如图 2 所示。 R_1, L_1 分别为整流侧输电线路与变压器的等效电阻和电感; u_{s1} 为风场侧母线三相基波电压。将有功与无功功率的实际值与参考值分别比较后经过 PI 调节器得出的结果输送至滑模变结构控制模块中, 计算得出控制项 v_1 和 v_2 , 将两者输入至反馈线性化控制模块中, 得到 2 个电压指令, 经过坐标转换后, 触发脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 生成脉冲对换流站进行控制。

2.2 GSVSC 反馈精确线性化滑模变结构控制策略

GSVSC 主要负责直流侧电压稳定地输出以及为交流系统提供必要的无功支撑^[18], 采用定无功功率控制与定直流电压控制。与 WFVSC 设计方法类

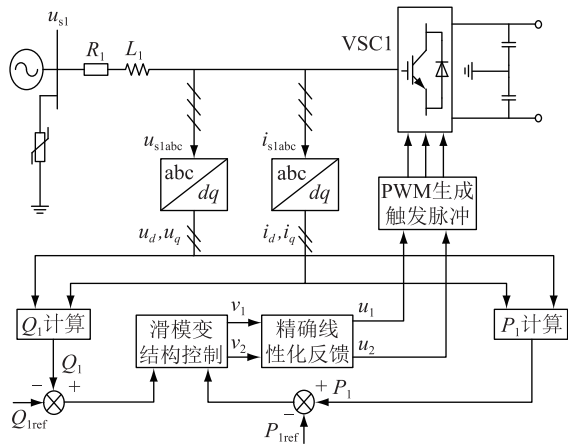


图2 整流侧控制系统原理

Fig.2 Principle diagram of rectifier side control system

似,GSVSC 基于反馈线性化滑模变结构的控制律表达式为:

$$\begin{cases} u_3 = \frac{2L_2v_4}{3U_{s2}} - \omega L_2x_4 \\ u_4 = \omega L_2x_5 - U_{s2} - \frac{2L_2C_2x_6v_3}{3U_{s2}} - \frac{3L_2U_{s2}x_4^2}{2C_2x_6} - \frac{L_2U_{dc2}}{C_2R_{dc}x_6} + \frac{2L_2x_6^2 - 2L_2x_6U_{dc2}}{3C_2U_{s2}R_{dc}^2} \end{cases} \quad (26)$$

其中, $x_4 = \dot{i}_{d2}$, $x_5 = \dot{i}_{q2}$, $x_6 = \dot{u}_{dc2}$ 。

$$\begin{cases} v_3 = -k_2(i_{q2} - i_{q2}^*) - \varepsilon_2 \text{sgn}(i_{q2} - i_{q2}^*) \\ v_4 = -k_2c_2(u_{dc2} - u_{dc2}^*) - (c_2 + k_2)x_6^* - \varepsilon_2 \text{sgn}[c_2(U_{dc2} - U_{dc2}^*) + x_6^*] \end{cases} \quad (27)$$

逆变侧的控制系统原理如图 3 所示, R_2, L_2 分别为逆变侧输电线路与变压器的等效电阻和电感; u_{s2} 为交流系统侧母线三相基波电压。加入滑模变的控制原理与整流侧相似。

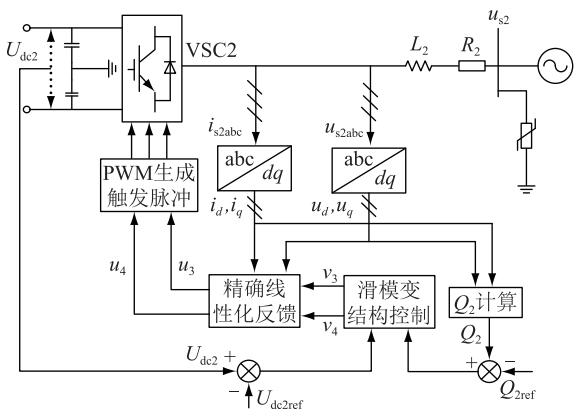


图3 逆变侧控制系统的原理

Fig.3 Principle of inverter control system

3 仿真分析

3.1 仿真模型

在 Matlab/Simulink 中建立风电场并网 VSC-HVDC 系统的仿真模型以验证所提策略的控制效果。整个仿真模型包括风电场部分、两侧换流站、直流输电线路以及交流系统。VSC-HVDC 系统两侧换流站之间通过 75 km 长的直流输电线路连接。2 个换流站之间通过调节功率控制脉冲信号实现功率传输,无其他通信联系。

风电场采用单机等效模型,将集中式并网的 75 台容量为 2 MW 的双馈发电机组,等效为一台容量为 150 MW 的双馈发电机组。双馈感应发电机组的参数如表 2 所示,VSC-HVDC 系统的具体参数取值如表 3 所示。

表2 双馈发电机的具体参数表

Table 2 Specific parameter of DFIG

参数	数值	参数	数值
额定功率/MW	2	额定电压/kV	690
定子电阻/ Ω	0.010 8	定子电感/H	0.102
极对数	2	互感/H	3.362
转动惯量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.1	转子电阻/ Ω	0.010 2
转子电感/H	0.11		

表3 VSC-HVDC 系统的具体参数取值表

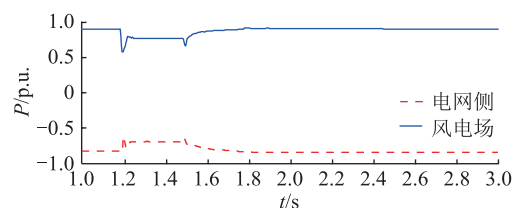
Table 3 Specific parameters of VSC-HVDC transmission system

参数名称	参数取值
频率/Hz	50
额定电压/kV	230
交流系统容量/ $(\text{MV} \cdot \text{A})$	2 000
换相电抗器/p.u.	0.15
交流滤波器额定无功功率/Mvar	40
平波电抗器(电感值)/mH	4

3.2 仿真结果与分析

3.2.1 风速变化时的仿真

(1) 采用反馈精确线性化控制方式时系统的动态响应。在 1.2 s 时,风速由 12 m/s 阶跃至 10 m/s,持续 0.3 s 后,在 1.5 s 时风速又恢复到 12 m/s。仿真结果如图 4 所示。



(a) 两侧有功功率波形

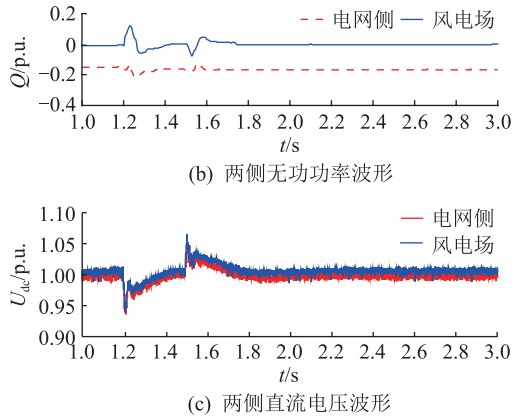


图4 反馈精确线性化控制下风速变化时仿真
Fig.4 Simulation chart of feedback precise linearization control for changing the wind speed

采用反馈线性化理论控制时,两侧有功和无功功率波形如图4中(a)和(b)所示,当风速为12 m/s时,WFVSC 输出有功功率标幺值稳定在0.85 p.u.左右。当风速降为10 m/s时,风电场输出有功功率的标幺值是0.7 p.u.左右,电网吸收的功率也随之减少。而有功功率与风速变化对两侧无功功率的影响不大。两侧直流电压的波形如图4中(c)所示,直流电压受有功变化影响较大,出现很大波动,超调量较大,所以鲁棒性有待改善。

(2) 采用反馈精确线性化滑模变结构控制方式时系统的动态响应。仿真结果如图5所示。

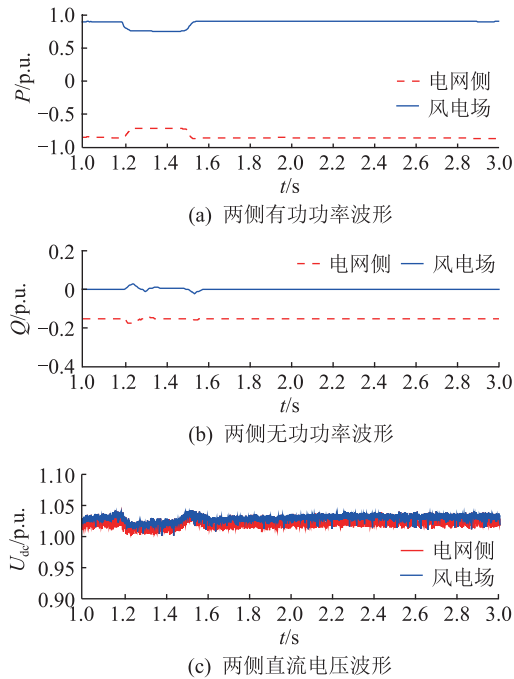


图5 反馈精确线性化滑模变结构控制下风速变化时仿真

Fig.5 Simulation chart of feedback precise linearization sliding mode variable structure control for changing the wind speed

加入滑模变结构控制时的功率仿真波形如图5(a)和(b)所示,与未加入滑模变结构的控制系统相比,系统恢复稳定的速度提高,无功功率几乎没有受到风速及有功功率的影响,仅有很小的波动。直流电压的波形如图5(c)所示,比未加入滑模变结构的系统提前0.2 s进入稳定状态,因此该系统能很好地抑制直流电压波动,提高并网系统的运行稳定性。

3.2.2 GSVSC 直流电压发生阶跃变化时的仿真

(1) 采用反馈精确线性化控制方式时系统的动态响应。设置风速为12 m/s以及WFVSC 无功功率参考值始终不变,2.4 s时 GSVSC 的直流参考电压由1 p.u.阶跃为0.9 p.u.,0.1 s后恢复到1 p.u.,将WFVSC 的直流电压参考值设置为1 p.u.,GSVSC 的无功功率参考值设置为0.9 p.u.,以显示2种波形。仿真结果如图6所示。

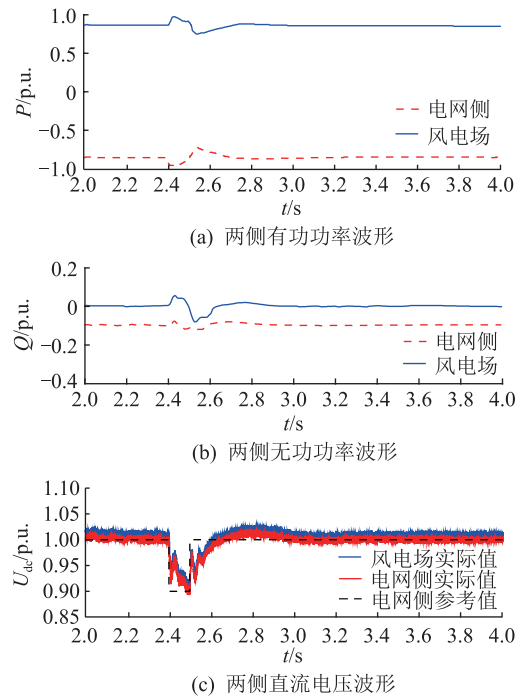


图6 反馈精确线性化控制下电网侧直流电压参考值变化时仿真

Fig.6 Simulation chart of feedback precise linearization control for changing the DC voltage reference value of power grid side

采用状态反馈精确线性化理论控制时,两侧的功率波形如图6(a)与(b)所示,风电场侧有功和无功功率受逆变器侧直流参考电压值变化的影响很大,幅值波动较大,电网侧有功和无功功率的波动也较大,持续0.4 s后才恢复到稳定运行状态。两侧直流电压的波形如图6(c)所示。两侧直流电压实际值的跟踪精度不高,实际值与参考值之间有一定的误差,恢复到稳定状态的速度也较慢。

(2) 采用反馈精确线性化滑模变结构控制方式

时系统的动态响应。仿真结果如图 7 所示。

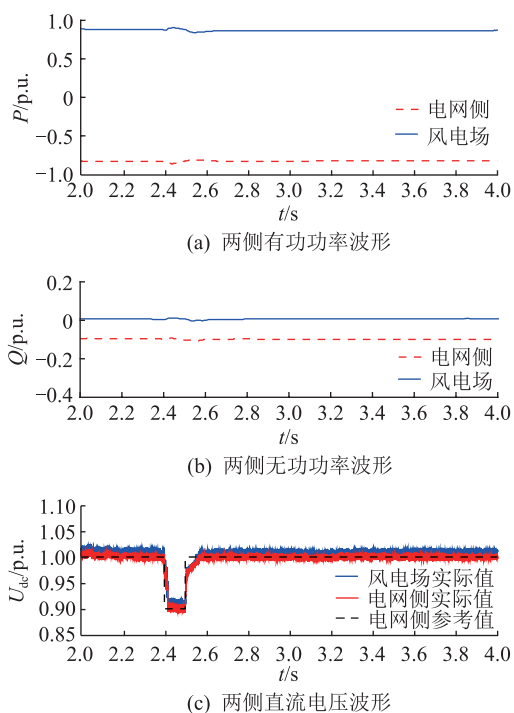


图 7 反馈精确线性化滑模变结构控制下
电网侧直流电压参考值变化时仿真

Fig.7 Simulation chart of feedback precise linearization sliding mode variable structure control for changing the DC voltage reference value of power grid side

加入滑模变结构控制,两侧功率仿真波形如图 7(a)与(b)所示。两侧的有功和无功功率受逆变侧直流电压变化的影响较小,控制系统的抗干扰能力得到提升。两侧的直流电压仿真波形如图 7(c)所示。与图 6(c)相比,波形更加平滑,并且该控制方式改善了直流电压实际值的跟踪速度与精度,直流电压更快地趋于稳定。

4 结语

文中建立基于高压直流输电的风电场并网仿真模型,在两侧换流站中运用反馈线性化理论,在此基础上又加上滑模变结构控制模块,设计了基于反馈精确线性化的滑模变结构控制模块,并在风速变化、GSVSC 直流电压参考值变化这 2 种情况下进行仿真,对比加入滑模变结构前后的仿真结果,可以看到实际值跟踪参考值的精度明显提高,加入滑模变结构控制能够使得并网系统在动态响应、抗干扰能力方面具有更良好的运行性能。

参考文献:

[1] 胡文旺,唐志军,林国栋,等. 柔性直流输电工程系统调试技术应用、分析与改进[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):197-203,210.
HU Wenwang, TANG Zhijun, LIN Guodong, et al. Application,

analysis and improvement of system commissioning technology for flexible DC transmission project[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10):197-203, 210.

- [2] GHANBARI T, FARJAH E. Development of an efficient solid-state fault current limiter for microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4):1829-1834.
- [3] 杨智豪,牟龙华,刘仲. 含 VSC-HVDC 并网风电场的电力系统最优潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12):36-41.
YANG Zhihao, MU Longhua, LIU Zhong. Optimal power flow of wind farm grid-connected system based on VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12):36-41.
- [4] 高丙团,夏超鹏,张磊,等. 基于虚拟同步电机技术的 VSC-HVDC 整流侧建模及参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2):534-544.
GAO Bingtuan, XIA Chaopeng, ZHANG Lei, et al. Modeling and parameters design for rectifier side of VSC-HVDC based on virtual synchronous machine technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):534-544.
- [5] 洪莎莎,武迪,侯凯. VSC-HVDC 的暂态数学模型分析及控制系统设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5):35-39.
HONG Shasha, WU Di, HOU Kai. Transient mathematical model analysis and design of control system of VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(5):35-39.
- [6] 黄澄,赵莉华. 基于 PR 控制的海上风电场并网 VSC-HVDC 系统[J]. 可再生能源, 2012, 30(5):29-33.
HUANG Cheng, ZHAO Lihua. Proportional resonant control of VSC-HVDC system for offshore wind farms[J]. Renewable Energy Resources, 2012, 30(5):29-33.
- [7] 邓旗,张英敏,李兴源. VSC-HVDC 互联系统的改进前馈控制策略[J]. 电测与仪表, 2017, 54(22):48-53, 110.
DENG Qi, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan. An improved feed-forward control strategy for interconnected VSC-HVDC transmission system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(22):48-53, 110.
- [8] 杨伟,章慧芸,仲海波. 基于模糊神经网络的 VSC-HVDC 系统控制器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8):115-120.
YANG Wei, ZHANG Huiyun, ZHONG Haibo. Research on controller of VSC-HVDC system based on fuzzy neural network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8):115-120.
- [9] 李向阳,刘应梅,王明东. 供电无源网络的 VSC-HVDC 系统控制器及 PI 参数研究[J]. 电力建设, 2016, 37(7):71-77.
LI Xiangyang, LIU Yingmei, WANG Mingdong. VSC-HVDC controller and PI parameters tuning in supplying passive networks[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(7):71-77.
- [10] 范心明,管霖,何健明,等. 风电接入下柔性直流输电的无源解耦控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10):311-319.
FAN Xinming, GUAN Lin, HE Jianming, et al. Decoupling passivity control of VSC-HVDC connected wind power[J].

- Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 311-319.
- [11] 唐权, 胡益, 叶圣永, 等. 基于滑模变结构控制的 VSC-MTDC 输电系统控制策略研究[J]. 电气自动化, 2017, 39(1): 29-33, 37.
- TANG Quan, HU Yi, YE Shengyong, et al. A study on control strategy for VSC-MTDC transmission system based on sliding mode variable structure control[J]. Power System & Automation, 2017, 39(1): 29-33, 37.
- [12] 吕敬, 蔡旭. 提高风场柔直并网系统稳定性的控制器参数优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 431-443, 674.
- LYU Jing, CAI Xu. Controller parameters optimization design for enhancing the stability of wind farm with VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 431-443, 674.
- [13] 杨浩, 张楠, 叶明佳. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 离散模型及其控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 37-42.
- YANG Hao, ZHANG Nan, YE Mingjia. Study of VSC-HVDC connected to passive network discrete model and its control strategies[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 37-42.
- [14] 江斌开, 王志新. 基于 VSC-MTDC 的平均值建模与控制策略[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(3): 1-8.
- JIANG Binkai, WANG Zhixin. Average-value modeling and control strategy of VSC-MTDC[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(3): 1-8.
- [15] 王辉, 汪小, 饶志蒙. 海上 DFIG 风电场的 VSC-HVDC 控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(11): 80-86.
- WANG Hui, WANG Xiao, RAO Zhimeng. VSC-HVDC control strategy for offshore difg wind farms[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2015, 27(11): 80-86.
- [16] 钱甜甜, 苗世洪, 白浩, 等. VSC-HVDC 系统的离散滑模控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 108-116.
- QIAN Tiantian, MIAO Shihong, BAI Hao, et al. Discrete sliding mode control of VSC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 108-116.
- [17] 张丽娜, 赵巧娥, 张乐乐. VSC-HVDC 型并网风电场的无源控制研究[J]. 自动化技术与应用, 2015, 34(11): 47-52.
- ZHANG Lina, ZHAO Qiaoe, ZHANG Lele. Research on passive control of VSC-HVDC for grid-connected of wind farms[J]. Techniques of Automation and Applications, 2015, 34(11): 47-52.
- [18] 王伟, 石新春, 付超, 等. 海上多端直流输电系统协调控制研究[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 8-15.
- WANG Wei, SHI Xinchun, FU Chao, et al. Coordinated control of multi-terminal HVDC transmission system for offshore wind farms[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 8-15.

作者简介:



鲁裕婷

鲁裕婷(1994),女,硕士在读,研究方向为电力系统分析、运行、控制与规划(E-mail: ytnjust@163.com);

都洪基(1960),男,硕士,副教授,研究方向为电力系统继电保护及安全自动装置;

朱鑫要(1987),男,博士,高级工程师,从事 FACTS 建模、电力系统稳定分析与控制等研究工作。

Feedback linearization sliding mode control of wind farm connected with VSC-HVDC system

LU Yuting¹, DU Hongji¹, ZHU Xinyao²

(1. College of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: In order to reduce the impact of wind farm grid-connected on power grid and improve the robustness of grid-connected system, a sliding mode variable structure control strategy with feedback precise linearization is adopted to design the control of converter stations on both sides of wind farm grid-connected system via flexible direct current transmission. Firstly, a mathematical model of the voltage source converter in the dq coordinate system is established. Then the sliding mode variable structure control method based on precise linearization decoupling is used to design the converter stations on both sides of flexible HVDC transmission system, which solves the problems of poor regulation ability and difficult parameter tuning of traditional double closed loop control method, and further improves the anti-interference ability and dynamic stability of the state feedback linearization control system. Finally, the simulation model of wind farm grid-connected flexible HVDC system is established in Matlab/Simulink. The simulation waveforms before and after adding sliding mode control are compared to verify the performance of the control system.

Keywords: wind farm interconnection; VSC-HVDC transmission system; control of converter stations; precise linear decoupling; sliding mode variable structure

(编辑 方晶)