DOI: 10.7641/CTA.2014.40307

电压源型高压直流输电系统的反步变结构控制

杨俊华^{1†},陈凯阳¹,王秋晶²,陈思哲¹,吴 捷³

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006; 2. 国网河南省电力公司 信阳供电公司, 河南 信阳 464000;

3. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要:为提高电压源高压直流输电系统(voltage source converter-high voltage direct current, VSC-HVDC)受扰时的 动态性能,提出一种可预测不确定度上界的反步变结构控制策略.通过分析电压源变流器*dq*0坐标下的数学模型, 应用传统反步设计方法,获得系统变流器控制策略:为消除系统实际运行中的扰动影响,加入一个含有不确定度 PI预测方案的变结构控制环节,使各子系统受扰时仍能满足Lyapunov渐近稳定条件.基于MATLAB/Simulink环境, 研究了VSC-HVDC系统交流侧两相短路故障工况,仿真结果表明,采用所提控制策略的控制效果优于传统双闭环 PI矢量控制,并可进一步提高VSC-HVDC系统的动态性能,系统鲁棒性增强.

关键词:电压源换流器;直流输电;反步法;变结构控制

中图分类号: TM721, TM46 文献标识码: A

Variable structure control of voltage source converter-high voltage direct current system based on backstepping

YANG Jun-hua^{1†}, CHEN Kai-yang¹, WANG Qiu-jing², CHEN Si-zhe¹, WU Jie³

(1. College of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China;

2. Xinyang Power Supply Bureau, State Grid Henan Electric Power Company, Xinyang Henan 464000, China;

3. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: A predictable uncertainty bound backstepping variable structure control strategy was proposed to improve the dynamic performance of the voltage sourced converters based high voltage direct current (VSC–HVDC) under disturbance. By analyzing the voltage source converter in *dq*0 synchronous rotating coordinate, the control strategy of the converter can be derived step by step through traditional backstepping method. To eliminate the effects of disturbance in the actual operation, a PI link was added to predict the bound of the uncertainties of system, so that each subsystem can meet Lyapunov asymptotically stable condition under disturbance. Finally, the conditions of VSC–HVDC system for two-phase AC-side short-circuit fault under the proposed control strategy was simulated in the MATLAB/Simulink environment, and the result was contrasted with that using the traditional double-loop vector PI control strategy. The simulation results show that the proposed control strategy can further improve the dynamic performance of VSC–HVDC system, and enhance the robustness of the system.

Key words: voltage source converter; DC transmission; backstepping design; variable structure control

1 引言(Introduction)

电压源型高压直流输电系统(voltage source converter-high voltage direct current, VSC-HVDC),占地 面积小、结构紧凑、易于模块化、控制灵活、不受输送 距离限制等,是解决远距离海上风电并网方案中可优 先考虑的技术^[1-3].维持直流侧电压恒定,实现两端交 流系统的功率传输,是VSC-HVDC系统控制的主要 目标,适当的控制方案可提高电力系统稳定性,为电

[†]通信作者. E-mail: yly93@163.com.

网提供电压支持^[4-5], VSC的控制器设计, 是学术界关注的热点.

传统双闭环矢量电流控制(double-loop vector current control, DVCC),结构简单,物理意义清晰,但存 在功率解耦不足、动态响应速度慢及数学模型依赖性 强等问题^[6-8],为此,近年来鲁棒自适应控制、最优控 制、人工智能控制等各种先进控制算法先后应用到 VSC-HVDC控制器设计中^[9-12].文献[13]采用线性矩

收稿日期: 2014-04-13; 录用日期: 2014-09-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307025, 51377026, 5177050); 广东省高等学校科技创新资助项目(2013KJCX0059); 广东省教育厅专项 重点实验室资助项目(IDSYS200701); 广东高校优秀青年创新人才培养计划资助项目(2012LYM0052); 广东省自然科学基金资助项目 (S2012040007895).

阵不等式算法(LMI)设计了VSC-HVDC系统的鲁棒 控制器,系统受扰时,可实时优化LMI矩阵参数,加快 系统动态反应,但算法的阶数较高,实际应用中实 现难度较大. 文献[14]运用反馈线性化理论, 设计了 VSC-HVDC系统的解耦控制器. 既简化了电流环的 反馈过程,也提高了系统的动态品质,但反馈线性化 方案需对系统参数精确可知,对参数和模型变化鲁棒 性不佳,事实上,系统中存在的非线性因素完全可以 采用非线性控制方法解决,为此,文献[15]采用滑模变 结构和PID相结合的控制策略,使VSC-HVDC系统有 较高稳定裕度,鲁棒性好,PID控制器较好地抑制了变 结构固有的抖颤现象,但该控制结构的性能取决于 PID控制器的效果,仍需优化调整PID结构参数,文 献[16]提出一种积分变结构直接功率控制策略,实现 了系统解耦控制,增强了VSC-HVDC系统的鲁棒性, 但算法较为复杂.

对高阶系统而言,反步法(backstepping design)是 一种行之有效的控制器设计方法,通过逐步修正算法 设计系统镇定控制器,设计过程简明,易为工程人员 所接受^[17].文献[18]采用模糊自适应与反步法结合的 方法设计了高速飞行器的纵向飞行控制器,可改善飞 控系统的稳定性.文献[19]提出了一种基于反步法的 自适应终端滑模变结构控制方法,抑制了非匹配扰动 对系统的影响,并以战机的飞控系统为例进行了仿真 验证.

针对VSC-HVDC系统控制,结合文献[15,20]提出 反步变结构控制(backstepping variable structure control, BVSC)策略. 在建立双端电压源换流站模型的基 础上,选取合适的Lyapunov函数确立VSC-HVDC系 统的反步解耦控制策略,简化控制器设计过程. 应用 变结构控制方法消除系统不确定因素的影响,使得输 电系统即使在大扰动下输入输出均能作出快速准确 控制,建立了MATLAB/Simulink环境下的系统模型, 仿真试验验证了所提控制策略的有效性.

VSC-HVDC的建模(Model of VSC-HVDC) 两电平双端VSC-HVDC系统结构如图1所示.





系统包括变压器、交流电抗器、滤波器、控制器

等; AC1为独立交流系统, 可为风电场; 输出功率 $P_{\rm f}$ 与 $Q_{\rm f}$, 直流侧电压 $U_{\rm dc}$, 电网侧AC2吸收功率 $P_{\rm d}$, $Q_{\rm d}$. 两侧变流器采用相同结构, 现以一端系统为例分析, 如图2所示.



图 2 换流器结构框图



由图2可得交流侧三相微分矢量方程:
$$\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{abc}}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{L}u_{\mathrm{sabc}} - \frac{1}{L}u_{\mathrm{cabc}} - \frac{R}{L}i_{\mathrm{abc}},\qquad(1)$$

经PARK变换可得

$$\begin{cases} \dot{I}_{\rm d} = -\frac{R}{L}I_{\rm d} + \omega I_{\rm q} + \frac{U_{\rm sd} - U_{\rm cd}}{L}, \\ \dot{I}_{\rm q} = -\frac{R}{L}I_{\rm q} - \omega I_{\rm d} + \frac{U_{\rm sq} - U_{\rm cq}}{L}. \end{cases}$$
(2)

VSC-HVDC直流侧电路由电容和直流线路组成, 如图3所示.



图 3 直流侧电路结构图 Fig. 3 Circuit diagram of the DC-side

直流侧电路方程为

$$C\frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{dc1}}}{\mathrm{d}t} = I_{\mathrm{dc1}} - I_{\mathrm{L}}.$$
(3)

因换流器损耗已由等效电阻表示,交流侧注入换流器 功率P_{c1}等于换流器注入直流侧功率P_{dc1},直流侧电 流I_{dc}可由下式计算

$$I_{\rm dc1} = \frac{P_{\rm dc1}}{U_{\rm dc1}} = \frac{3(U_{\rm sq1}I_{\rm q1} + U_{\rm sd1}I_{\rm d1})}{2U_{\rm dc1}}.$$
 (4)

将式(3)代入式(4)得

$$\frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{dc1}}}{\mathrm{d}t} = \frac{3U_{\mathrm{sq1}}I_{\mathrm{q1}}}{2CU_{\mathrm{dc1}}} + \frac{3U_{\mathrm{sd1}}I_{\mathrm{d1}}}{2CU_{\mathrm{dc1}}} - \frac{I_{\mathrm{L}}}{C}.$$
 (5)

假定两侧交流网络为三相对称系统且稳定运行, 将同步旋转坐标系的d轴定向于电网电压空间矢 量 U_s 方向上,即 U_{sd} 等于 U_s 的幅值大小, U_{sq} 等于零. 综上,dq0坐标下VSC-HVDC的动态数学模型为

$$\begin{cases} \dot{U}_{\rm dc} = \frac{3U_{\rm sd}I_{\rm d}}{2CU_{\rm dc}} - \frac{I_{\rm L}}{C}, \\ \dot{I}_{\rm d} = -\frac{R}{L}I_{\rm d} + \omega I_{\rm q} + \frac{U_{\rm sd} - U_{\rm cd}}{L}, \\ \dot{I}_{\rm q} = -\frac{R}{L}I_{\rm q} - \omega I_{\rm d} + \frac{U_{\rm cq}}{L}, \end{cases}$$
(6)

式中: V_{dc} , I_L 为直流侧电压、电流; I_d , I_q 分别为交流 侧电流的dq分量; V_{sd} , V_{sq} 分别为交流侧电压的dq分 量; V_{cd} , V_{cq} 分别为开关端电压的dq分量.

双端功率由瞬时功率理论得出[21].有

$$\begin{cases} P_{1} = \frac{3}{2}(U_{\text{sq1}}I_{\text{q1}} + U_{\text{sd1}}I_{\text{d1}}) = \frac{3}{2}U_{\text{sd1}}I_{\text{d1}}, \\ Q_{1} = \frac{3}{2}(U_{\text{sq1}}I_{\text{d1}} - U_{\text{sd1}}I_{\text{q1}}) = -\frac{3}{2}U_{\text{sd1}}I_{\text{q1}}, \end{cases}$$

$$(7)$$

$$\begin{cases} P_2 = \frac{3}{2}(U_{\rm sq2}I_{\rm q2} + U_{\rm sd2}I_{\rm d2}) = \frac{3}{2}U_{\rm sd2}I_{\rm d2}, \\ Q_2 = \frac{3}{2}(U_{\rm sq2}I_{\rm d2} - U_{\rm sd2}I_{\rm q2}) = -\frac{3}{2}U_{\rm sd2}I_{\rm q2}. \end{cases}$$

$$\tag{8}$$

3 控制器设计(Controller design)

交流线路阻抗变化会引起VSC-HVDC系统参数 的不确定性.通常,线路阻抗根据系统短路容量设定, 而系统的运行工况会随阻抗的变化而改变,在这种情 况下,不确定因素是恒定的.在控制器设计中系统的 不确定因素在方程中由F₂, F₃, F₄, F₅表示,代表交流 侧系统阻抗参数由于系统短路故障、气候环境等因 素引起的变化.

反步法控制^[22-23]是一种基于Lyapunov稳定理论 综合考虑控制律与系统自适应性的控制方法,可将一 个复杂的高阶系统分成若干个子系统,设计各子系统 的"虚拟控制律",并运用积分等方式修正虚拟控制 量,对系统进行静态补偿.系统结构变换后应为严格 参数反馈系统或类似非线性系统.

变结构控制响应快速, 对外界干扰和控制对象参数摄动不敏感, 动态性和鲁棒性好, 但实际系统中, 模型的不确定性往往是非匹配的, 高阶数学模型为控制器设计带来一定难度^[24], 结合反步法能简化控制器设计过程. VSC-HVDC系统的控制策略, 可根据反步法逐步得出, 通过加入变结构控制消除不确定因素对系统的影响, 改善系统的动态响应性能和鲁棒性.

3.1 整流侧控制器设计(Rectifier controller design)

整流侧的控制目标为直流侧电压与无功功率,选 取状态变量 $(x_1, x_2, x_3) = (U_{dc}, I_{d1}, I_{q1})$,控制输入 为 U_{cd1} 和 U_{cq1} ,整流侧数学模型可描述为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{ax_2}{x_1} - T, \\ L\dot{x}_2 = -Rx_2 + \omega Lx_3 + U_{\rm sd} - U_{\rm cd} + F_2, \\ L\dot{x}_3 = -Rx_3 - \omega Lx_2 - U_{\rm cq} + F_3, \end{cases}$$
(9)

式中: $a = 3U_{sd}/(2C)$, $T = I_L/C$, F_2 , F_3 为系统由于 阻抗参数变动而产生的不确定部分.

根据反步法原理,首先考虑 x_1 子系统. 定义跟踪 误差为 $z_1 = x_{1d} - x_1$,则有 $\dot{z}_1 = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1$,选取Lyapunov函数 $V_1 = z_1^2/2$,有

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1 (\dot{x}_{1d} + T - a \frac{x_2}{x_1}).$$
 (10)

为使 x_1 子系统稳定, 将 x_2 作为 x_1 子系统的虚拟输入, 定义跟踪误差为 $z_2 = \beta - x_2$, 代入式(10)可得

$$\dot{V}_1 = z_1(\dot{x}_{1d} - \frac{a\beta}{x_1} + T) + \frac{az_1z_2}{x_1}.$$
 (11)

选取x2的期望输入

$$\beta = \frac{x_1}{a} (T + \dot{x}_{1d} + k_1 z_1), \ k_1 > 0.$$
(12)

为改善系统的鲁棒性,引入滑模项,定义切换函数

$$\sigma = mz_1 + Lz_2, \ m > 0. \tag{13}$$

取Lyapunov函数 $V_2 = V_1 + 1\sigma^2/2$,则有

$$\dot{V}_{2} = -k_{1}z_{1}^{2} + \frac{az_{1}z_{2}}{x_{1}} + \sigma(m\dot{z}_{1} + L\dot{z}_{2}) = -k_{1}z_{1}^{2} + \frac{az_{1}z_{2}}{x_{1}} + \sigma[m(-k_{1}z_{1} + \frac{az_{2}}{x_{1}}) + L\dot{\beta} + Rx_{2} - \omega Lx_{3} - U_{\rm sd} + U_{\rm cd} - F_{2}].$$
(14)

设计控制器输入

$$U_{\rm cd\,1} = -m\left(-k_1z_1 + \frac{az_2}{x_1}\right) - L\dot{\beta} - Rx_2 + \omega Lx_3 + U_{\rm sd} - \bar{F}_2 \text{sgn }\sigma - h(\sigma + n\text{sgn }\sigma),$$
(15)

式中 \overline{F}_2 为不确定项的上界.

考虑整流侧无功控制,式(2)中Iq控制方程为

$$L\dot{x}_3 = -Rx_3 - \omega Lx_2 - U_{\rm cq} + F_3.$$
(16)

定义跟踪误差 $z_3 = x_{3d} - x_3$, 选取Lyapunov函数 $V_3 = Lz_3^2/2$, 则

$$\dot{V}_3 = z_3 (L\dot{x}_{3d} + Rx_3 + \omega Lx_2 + U_{cq} - F_3).$$
(17)

设计控制器输入为

$$U_{\rm cq_1} = -L\dot{x}_{\rm 3d} - Rx_3 - \omega Lx_2 - F_3 {\rm sgn} \ z_3 - k_3 z_3, \tag{18}$$

其中k₃>0.

由于系统在受扰过程中线路阻抗参数变化不可知, 因此无法得知不确定因素上界 \bar{F}_2 , \bar{F}_3 的具体数值, 这 里采用一个PI环节来对 \bar{F}_2 , \bar{F}_3 进行预测, 用该项消除 扰动对系统的影响:

$$\begin{cases} \bar{F}_2 = K_{\rm p}(z_1 + z_2) + K_{\rm i} \int (z_1 + z_2) dt, \\ \bar{F}_3 = K_{\rm p} z_3 + K_{\rm i} \int z_3 dt. \end{cases}$$
(19)

3.2 逆变侧控制器设计(Inverter-side controller de-sign)

网侧选取有功和无功功率为控制目标,选取状态 变量 $(x_4, x_5) = (I_{d2}, I_{q2})$,控制输入为 V_{cd2} 和 V_{cq2} .仿 照整流侧,采用反步法设计控制输入,网侧同步旋转 坐标下的数学模型为

$$\begin{cases} L\dot{x}_4 = -Rx_4 + \omega Lx_5 + U_{\rm sd2} - U_{\rm cd2} + F_4, \\ L\dot{x}_5 = -Rx_5 - \omega Lx_4 - U_{\rm cq2} + F_5, \end{cases}$$
(20)

式中 F_4 和 F_5 为系统由于阻抗参数变动而产生的不确 定部分.

定义跟踪误差 $z_4 = x_{4d} - x_4, z_5 = x_{5d} - x_5$,取 Lyapunov函数为

$$\begin{cases} V_4 = \frac{1}{2}Lz_4^2, \\ V_5 = \frac{1}{2}Lz_5^2. \end{cases}$$
(21)

类似地设计控制器输入为

$$\begin{cases} U_{cd2} = -L\dot{x}_{4d} - Rx_4 + \omega Lx_5 + U_{sd2} - \\ k_4 z_4 - \bar{F}_4 \text{sgn } z_4, \\ U_{cq2} = -L\dot{x}_{5d} - Rx_5 - \omega Lx_4 + U_{sq2} - \\ k_5 z_5 - \bar{F}_5 \text{sgn } z_5, \end{cases}$$
(22)

其中: k₄>0, k₅>0.

同样,由于无法得知不确定因素上界 F_4 , F_5 的具体数值,采用一个PI环节预测 F_4 , F_5 ,用该项消除扰动对系统的影响:

$$\begin{cases} \bar{F}_{4} = K_{p}z_{4} + K_{i}\int z_{4}dt, \\ \bar{F}_{5} = K_{p}z_{5} + K_{i}\int z_{5}dt. \end{cases}$$
(23)

3.3 控制器稳定性分析(Controller stability analy-sis)

由以上得出了虚拟控制量式(12)以及整流侧与逆 变侧控制器的控制输入式(15),(18)和式(22),下面对 设计输入下系统的稳定性进行分析.

将所选定的虚拟变量式(12),代入已选定的Lya-

punov函数式(10),有

$$\dot{V}_1 = -k_1 z_1^2 + \frac{a z_1 z_2}{x_1}.$$
 (24)

显然, 当满足条件 $z_2 = 0$ 使 x_2 成功跟踪 β 时, 有 $\dot{V}_1 = -k_1 z_1^2 \leq 0$. 根据Lyapunov理论, x_1 子系统渐近稳定.

将所选定的整流侧控制输入式(15),代入已选定的Lyapunov函数式(14)有

$$\dot{V}_{2} = \frac{az_{1}z_{2}}{x_{1}} - k_{1}z_{1}^{2} - h\sigma^{2} - hn|\sigma| - \bar{F}_{2}|\sigma| - F_{2}\sigma \leq -k_{1}z_{1}^{2} + z_{1}z_{2} - h\sigma^{2} - h\beta|\sigma| = -z^{T}Qz - h\beta|\sigma|.$$
(25)

取

$$Q = \begin{bmatrix} k_1 + hm^2 & hmL - \frac{1}{2} \\ hmL - \frac{1}{2} & hL^2 \end{bmatrix},$$

若Q正定, 则 $\dot{V}_2 \leq z^T Q z - h\beta |\sigma| \leq 0$. 选取 $h, k_1 = m$ 值, 使 $|Q| = h(k_1 L^2 + mL) - 1/4 > 0$, 则 x_1 子系统 渐近稳定.

将所选定的整流侧控制输入式(18),代入已选定的Lyapunov函数式(17)有

$$\dot{V}_3 = -k_3 z_3^2 - F_3 z_3 - \bar{F}_3 |z_3| \leqslant 0,$$
 (26)

能保证式子为负,则x3子系统渐近稳定.

可以看出,由于系统中存在不确定因素 $F_i(i = 2, 3, 4, 5)$ 的影响,有可能导致控制器失去稳定.通过引入变结构补偿项 \bar{F}_i sgn $z_i(i = 2, 3, 4, 5)$,使系统在参数摄动时依旧能够满足Lyapunov渐近稳定条件,使系统对干扰具有一定的鲁棒性.

类似可验证逆变侧稳定性,这里不作赘述.因此, 两端换流站的控制结构框图如图4-5所示.



图 4 整流侧换流站控制结构 Fig. 4 Control structure of converter for rectifier side



图 5 逆变侧换流站控制结构

Fig. 5 Control structure of converter for inverter side

4 仿真研究(Simulation study)

传统线性控制器,如传统双闭环矢量电流控制,都 是基于系统参数恒定的条件下设计的,系统参数摄动 会导致稳态工况点的变化,而反步变结构控制策略并 不要求模型参数精确可知,可在一定程度上消除该类 影响.通过仿真研究,对比分析了采用DVCC和BVSC 两类控制策略的控制效果.

仿真物理模型如图6所示.为模拟系统在参数发生 变动时的运行工况,假定整流侧和逆变侧的交流线路 分别发生两相短路故障,故障位置在线路1和线路2中 段,线路相间短路电阻为2Ω.



图 6 仿真物理模型结构



仿真参数:两端交流侧额定电压为10 kV,交流线路阻抗为0.00217+j0.00726,10 km直流线路等效阻抗为0.1+j0.092,直流侧电容为 $C1 = C2 = 5700 \mu$ F,额定直流侧电压为20 kV,额定容量为20 MW.(选取基准功率20 MVA,基准电压20 kV),采用SVPWM调制方式.

工况1 t < 0.41 s时,系统处于稳定运行,当t = 0.41 s时,交流线路1发生BC相间经2 Ω阻抗短路故障, 不采用重合闸,并持续时长0.1 s后切除故障.

工况 2 T < 0.41 s时,系统处于稳态运行,当t = 0.41 s时,交流线路2发生BC相间经2 Ω阻抗短路故障 故障,不采用重合闸,并持续时长0.1 s后切除故障.

这里所采用反步变结构控制器参数为 $k_1 = 800$, $k_2 = 1500$, $k_3 = 2000$, $k_4 = 1500$, $k_5 = 1500$, h = 11.8, m = 200, n = 4, $K_p = 2000$, $K_i = 500$. 参数的给定, 很大程度上取决于仿真系统的运行效果, 未必是最优值, 寻优问题相关文献有详述, 本文不作讨论.

图7-8给出了仿真结果,指令参考值由较细点线 代表.由此可见,稳态工况下,传统双闭环矢量电流控 制器DVCC能很好追踪指令信号,但当故障发生时, 系统的动态响应不佳.两种故障工况下,均无法追踪 指令信号,偏差较大.也就是说,线性控制器仅能在小 扰动情况下维持系统稳定.







VSC-HVDC系统采用反步变结构控制策略BVSC 时,在两种故障工况下,系统均能逐步靠近指令信号, 并在故障切除后较短时间内追踪指令信号且恢复稳 定运行.也就是说,BVSC控制器能在大扰动情况下维 持系统稳定,在一定程度上克服系统运行中所遇到的 不确定性因素,鲁棒性增强,系统动态响应明显优于 传统线性控制器.

5 结论(Conclusions)

VSC-HVDC系统是一个非线性、强耦合系统,应 用反步设计方法,可将高阶系统控制设计有效降阶为 若干低阶控制子系统设计,设计过程简化.控制结构 中加入可预测不确定因素上界的变结构控制可消除 不确定因素对系统的影响,使得系统在较大扰动下亦 能快速准确稳定,仿真结果表明,与传统线性控制器 效果相比,所提反步变结构控制策略克服了不确定因 素对VSC-HVDC系统运行影响,提高了系统的动态 性能和鲁棒性.

参考文献(References):

- FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(3): 592 – 602.
- [2] 徐政, 屠卿瑞, 裘鹏. 从2010国际大电网会议看直流输电技术的发展 方向 [J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3070 – 3077.
 (XU Zheng, TU Qingrui, QIU Peng. New trends in HVDC technology viewed through CIGRE 2010 [J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(12): 3070 – 3077.)
- [3] VENKATARAMANAN G, JOHNSON B K. A superconducting DC transmission system based on VSC transmission technologies [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2003, 13(2): 1922 1925.
- [4] ZHANG L, HARNEFORS L, NEE H P. Modeling and control of VSC-HVDC links connected to island systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(2): 783 – 793.
- [5] LATORRE H F, GHANDHARI M. Improvement of power system stability by using a VSC-HVDC [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(2): 332 – 339.
- [6] 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.
- [7] 魏晓云,孙辉,徐凤阁,等. 矢量电流控制的电压源换流器式高压直 流输电系统动态特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 34 – 40.

(WEI Xiaoyun, SUN Hui, XU Fengge, et al. Dynamic performance analysis of vector current controller for VSC–HVDC [J]. *Proceedings* of the CSEE, 2010, 30(6): 34 – 40.)

- [8] DU C, SANNINO A, BOLLEN M H J. Analysis of the control algorithms of voltage-source converter HVDC [C] //2005 IEEE Russia Power technology. Petersburg, Russia: IEEE, 2005, 6: 1 – 7.
- [9] RUAN S Y, LI G J, PENG L, et al. A nonlinear control for enhancing HVDC light transmission system stability [J]. *International Journal* of Electrical Power & Energy Systems, 2007, 29(7): 565 – 570.
- [10] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明. 适用于电压源型高压直流输电的控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 39 43.
 (HU Zhaoqing, MAO Chengxiong, LU Jiming. A novel control strategy for voltage sourced converters based HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 39 43.)
- [11] 邱大强, 李群湛, 南晓强. 电网不对称故障下VSC-HVDC系统的直接功率控制 [J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 1012 1018.
 (QIU Daqiang, LI Qunzhan, NAN Xiaoqiang. Direct power control of VSC-HVDC system under unsymmetrical fault of grid [J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(4): 1012 1018.)
- [12] VRIONIS T D, KOUTIVA X I, VOVOS N A, et al. Control of an HVDC link connecting a wind farm to the grid for fault ride-through

enhancement [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(4): 2039 – 2047.

- [13] DURRANT M, WERNER H, ABBOTT K. Synthesis of multiobjective controllers for a VSC–HVDC terminal using LMIs [C] *I/The 43rd IEEE conference on decision and control*. Nassau: IEEE, 2004, 5(4): 4473 – 4478.
- [14] 李国栋, 毛承雄, 陆继明, 等. 基于逆系统理论的VSC-HVDC 新型 控制 [J]. 高电压技术, 2005, 31(8): 45 - 50.
 (LI Guodong, MAO Chengxiong, LU Jiming, et al. New control of VSC-HVDC based on the inverse system theory [J]. *High Voltage Engineering*, 2005, 31(8): 45 - 50.)
- [15] 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.
- [16] 郑连清,朱蒙,陆治国,等. VSC-HVDC双积分滑模解耦控制器设计
 订]. 湖南大学学报, 2013, 40(2): 52 58.
 (ZHENG Lianqing, ZHU Meng, LU Zhiguo, et al. Design of double integral sliding mode decoupling controller for VSC-HVDC system
 [J]. Journal of Hunan University, 2013, 40(2): 52 58.)
- [17] 程代展, 洪奕光, 秦化淑. 多输入非线性系统后推型 [J]. 控制理论与应用, 1998, 15(6): 824 830.
 (CHENG Daizhan, HONG Yiguang, QIN Huashu. Backstepping forms of multi-input nonlinear systems [J]. Control Theory & Applications, 1998, 15(6): 824 830.)
- [18] 高道祥, 孙增圻, 罗熊, 等. 基于backstepping的高超声速飞行器模糊 自适应控制 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25(5): 805 – 810.
 (GAO Daoxiang, SUN Zengqi, LUO Xiong, et al. Fuzzy adaptive control for hypersonic vehicle via backstepping method [J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(5): 805 – 810.)
- [19] 周丽,姜长生,都延丽.一种基于反步法的鲁棒自适应终端滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(6): 678 682.
 (ZHOU Li, JIANG Changsheng, DU Yanli. A robust and adaptive terminal sliding mode control based on backstepping [J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(6): 678 682.)

- [20] RIAN 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.
- [21] 李庚银,陈志业,丁巧林,等. dq0坐标系下广义瞬时无功功率定义及其补偿 [J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(3): 176 179.
 (LI Gengyin, CHEN Zhiye, DING Qiaolin, et al. Definition of generalized instantaneous reactive power in dq0 coordinates and its compensation [J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(3): 176 179.)
- [22] 胡跃明. 非线性控制系统理论与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社,
 2002.
 (HU Yueming. Theory and Application for Nonlinear Control Sys-
- tem [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.)
 [23] 杨俊华, 吴捷, 胡跃明. 反步方法原理及在非线性鲁棒控制中的应用 [J]. 控制与决策, 2002, 17(增刊): 641 647. (YANG Junhua, WU Jie, HU Yueming. Backstepping method and its applications to nonlinear robust control [J]. Control and Decision,
- [24] HUNG J Y, GAO W, HUNG J C. Variable structure control: a survey [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1993, 40(1): 2 – 22.

作者简介:

2002, 17(Suppl): 641 – 647.)

杨俊华 (1965--), 男, 教授, 博士, 主要从事电机电器及其控制、 风力发电机组的设计与控制的研究开发和教学工作, E-mail:

yly93@163.com;

陈凯阳 (1989--), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电控制, E-mail: 367029359@qq.com;

王秋晶 (1987-), 女, 助理工程师, 主要从事电力调度及继电保护 工作, E-mail: qiujingwang132@126.com;

陈思哲 (1981--), 男, 副教授, 博士, 主要从事风力发电及其控制 技术方面的研究, E-mail: cszscut@126.com;

吴 捷 (1937-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统自动 化控制、非线性控制、风力发电系统、电力电子技术等方面的研究, E-mail: epjiewu@scut.edu.cn.