

向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统的新型控制器设计

包宗贤¹, 邹超²

(1. 四川建筑职业技术学院, 四川 绵阳 618000; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 在同步旋转坐标系下采用电压源型高压直流输电的暂态数学模型, 提出一种向无源网络供电的电压源型高压直流输电系统的新型控制策略。基于状态反馈线性化的逆系统方法, 推导电压源型高压直流输电系统的逆系统模型, 构造出伪线性系统, 实现了对电压源型高压直流输电系统有功功率和无功功率的解耦, 最后采用滑模变结构控制理论对该伪线性系统进行综合, 设计出滑模变结构控制器, 并对于反馈线性化中重要的隐动态问题进行了讨论, 保证了控制系统的稳定性。仿真结果表明, 该控制器具有较好的动态性能和鲁棒性。

关键词: 滑模变结构控制; 电压型高压直流输电; 逆系统理论; 伪线性系统; 隐动态

New control design for VSC-HVDC supplying passive networks

BAO Zong-xian¹, ZOU Chao²

(1. Sichuan College of Architecture Technology, Mianyang 618000, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The transient mathematical model for the VSC-HVDC system in d-q synchronous reference frame is developed and its new controllers are designed. It applies the inverse system method based on nonlinear feedback linearization theory. An inverse system model of VSC-HVDC system is deduced and a pseudo linear system is constructed for the decouple control of the active and reactive power. Finally, by synthesizing the pseudo linear system, a sliding mode variable structure controller is proposed. Furthermore, as an essential problem in nonlinear feedback linearization, the zero dynamics is researched in detail so that the stability of the control system is guaranteed. The simulation results show that the control strategy mentioned in this paper has good dynamics and steady state performance.

Key words: sliding mode variable structure control; VSC-HVDC; inverse system method; pseudo linear system; implicit dynamic

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)14-0022-06

0 引言

基于电压源型换流器 VSC (voltage source converter) 的新型直流输电 (VSC-HVDC) 系统能够在控制其传输的有功功率的同时^[1], 动态地向交流系统补偿无功功率, 起到 HVDC 和静止无功补偿器 SVC (static var Compensator) 共同作用才能达到的效果^[2]。因此, VSC-HVDC 系统在连接分散的小型发电厂 (如风力发电、太阳能发电等) 到电网、向远距离负荷供电等领域具有广阔的应用前景^[3]。

对于 VSC-HVDC 这样一个多变量、强耦合、非线性的系统, 以往采用的基于线性控制理论的常规控制^[4-6]往往不能保证系统在大扰动下具有良好的动态响应特性; 电力系统常用的微分几何全局线性化方法^[7], 也很难找到相应的微分同胚量。而逆系统方法^[8]是一种非线性系统反馈线性化控制的新理论, 十几年来得到了显著发展, 该方法具有物理概

念清晰、适用面广、应用简便等特点, 并已成功应用于一些系统的控制。文献[5,6,11]中的 VSC-HVDC 控制器均采用 PI 控制, 但其参数不易确定。而滑模变结构控制^[9]是一种非线性控制方法, 它具有响应快速、对参数变化及扰动不敏感、鲁棒性强、物理实现简单等优点^[10]。文献[14]采用逆系统理论并结合最优控制理论设计了两端为无穷大系统的 VSC-HVDC 控制器, 但对其中非常重要的隐动态问题未作讨论, 导致了理论上的不完整。

正是基于以上背景, 本文在同步旋转坐标系下, 采用向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统的暂态数学模型, 通过逆系统理论^[8]将非线性 VSC-HVDC 系统强制线性化, 构造出伪线性系统。为了使系统获得较好的控制性能, 本文在由逆系统方法得出的伪线性系统模型基础上, 设计出滑模变结构控制策略。最后, 对于反馈线性化中重要的隐动态问题进行了探讨, 保证了所得结果的可行性。

该控制器在大扰动或较大范围内保持系统的稳定性, 并做出快速准确的响应。

1 同步旋转坐标系下 VSC-HVDC 系统的暂态数学模型

如图 1 所示, 向无源交流网络供电的 VSC-HVDC 系统, 其左侧为无穷大交流系统, 右侧为三相对称负载, 忽略换流电抗器电阻和换流器开关损耗。其中, 相量 $V_{s1[abc]}$ 和 $V_{s2[abc]}$ 分别为 VSC-HVDC 所联结的 2 个交流系统的母线三相电压基波相量; 相量 $i_{L1[abc]}$ 、 $i_{L2[abc]}$ 分别为 VSC-HVDC 所联结的 2 个交流系统的母线三相电流基波相量; V_{dc1} 和 V_{dc2} 分别为换流器 VSC1 和 VSC2 侧的直流电压; i_{L3} 为直流电流; 相量 $V_{R[abc]}$ 和 $V_{N[abc]}$ 分别为整流、逆变侧交流侧的三相电压基波相量; C_1 、 C_2 分别为整流、逆变侧电容; L_1 、 L_2 分别为整流、逆变侧变压器的等效电感; R 、 L 分别为直流线路的等效电阻和电感; P_1 、 Q_1 为整流侧输入有功、无功; P_2 、 Q_2 为逆变侧输出有功、无功。

设三相电网电压对称, 根据换流器的拓扑结构, 可得三相 abc 坐标系下的数学模型:

$$\begin{cases} U_{R[abc]} = -L_1 \frac{di_{L1[abc]}}{dt} + U_{s1[abc]} \\ U_{N[abc]} = L_2 \frac{di_{L2[abc]}}{dt} + U_{s2[abc]} \\ U_{dc1} - U_{dc2} = Ri_{L3} + L_3 \frac{di_{L3}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

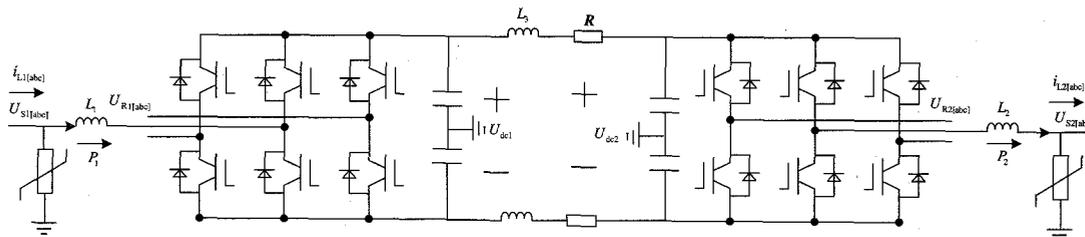


图 1 向无源网络供电时 VSC-HVDC 系统结构图

Fig.1 Block diagram for VSC-HVDC which supplies a passive network

2 VSC-HVDC 系统的逆系统

本文采用逆系统方法完成系统的精确线性化设计。逆系统方法的基本思想是用给定系统的模型生成一种可用反馈方法实现的原系统的“ α 阶积分逆系统”, 将其补偿为具有线性传递关系且已解耦的规范化系统(伪线性系统)。其中核心步骤是对逆系统

对整流、逆变侧作派克变换, 则可将式(1)的模型由三相静止坐标系 abc 转化到同步旋转坐标系 dq0。由于三相电压对称, 故不存在 0 轴分量。则, VSC-HVDC 系统的数学模型见公式 (2)。

$$\begin{cases} \frac{di_{L1}^d}{dt} = \omega i_{L1}^q - \frac{u_R^d}{L_1} + \frac{U_{s1}^d}{L_1} \\ \frac{di_{L1}^q}{dt} = -\omega i_{L1}^d - \frac{u_R^q}{L_1} + \frac{U_{s1}^q}{L_1} \\ \frac{di_{L3}}{dt} = -\frac{Ri_{L3}}{L_3} + \frac{U_{dc1} - U_{dc2}}{L_3} \\ \frac{di_{L2}^d}{dt} = \omega i_{L2}^q + \frac{u_N^d}{L_2} - \frac{U_{s2}^d}{L_2} \\ \frac{di_{L2}^q}{dt} = -\omega i_{L2}^d + \frac{u_N^q}{L_2} - \frac{U_{s2}^q}{L_2} \\ \frac{dU_{dc1}}{dt} = -\frac{i_{L3}}{C_1} + \frac{3(u_R^d i_{L1}^d + u_R^q i_{L1}^q)}{2C_1 U_{dc1}} \\ \frac{dU_{dc2}}{dt} = \frac{i_{L3}}{C_2} - \frac{3(u_N^d i_{L2}^d + u_N^q i_{L2}^q)}{2C_2 U_{dc2}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_R^d 、 u_R^q 、 i_{L1}^d 、 i_{L1}^q 分别为整流侧交流母线基波电压和交流系统基波电流的 d 轴和 q 轴分量; u_N^d 、 u_N^q 、 i_{L2}^d 、 i_{L2}^q 分别为逆变侧交流母线基波电压和交流系统基波电流的 d 轴和 q 轴分量; U_{s1}^d 、 U_{s1}^q 、 U_{s2}^d 、 U_{s2}^q 分别为换流器交流侧无穷大系统的基波电压的 d 轴和 q 轴分量; ω 为系统的角频率。

式 (2) 即为向无源网络供电时 VSC-HVDC 系统的 7 阶模型^[11]。

的输出方程按一定的规则进行变量替换, 即对非线性系统强制线性化。

2.1 系统输出量的选择

在多输入多输出系统中, 选取合适的输出为反馈量对于保证系统稳定性非常重要。VSC-HVDC 系统的控制目标是实现对电压源型高压直流输电系统有功功率和无功功率的解耦。且在忽略换流电抗器

电阻和换流器开关损耗情况下,当系统达到稳态时,则有

$$P_1 = U_{dc1} i_{L3}, \quad P_2 = U_{dc2} i_{L3}, \quad U_{s1}^d = U_{s1},$$

$$Q_2 = \frac{3(U_{s2}^q i_{L2}^d - U_{s2}^d i_{L2}^q)}{2}, \quad Q_1 = \frac{3U_{s1}^d i_{L1}^q}{2}$$

因此,要有效控制整流、逆变侧的有功和无功,实际上是控制直流电流和整流、逆变交流侧 d 轴、q 轴电流。故本文选择的输出量为 i_{L3} 、 i_{L1}^q 、 i_{L2}^d 和 i_{L2}^q 。

2.2 可逆性分析

VSC-HVDC 系统的状态变量为:

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7]^T =$$

$$[i_{L1}^d, i_{L1}^q, i_{L3}, i_{L2}^d, i_{L2}^q, U_{dc1}, U_{dc2}]^T$$

选取输出变量为:

$$Y = [y_1, y_2, y_3, y_4]^T = [i_{L3}, i_{L1}^q, i_{L2}^d, i_{L2}^q]^T$$

取其输入变量为:

$$U = [u_1, u_2, u_3, u_4]^T = [u_R^d, u_R^q, u_N^d, u_N^q]^T$$

则式 (2) 系统方程可表示为:

$$\dot{X} = f(X, U) = \begin{cases} \omega x_2 - \frac{u_1}{L_1} + \frac{U_{s1}^d}{L_1} \\ -\omega x_1 - \frac{u_2}{L_1} + \frac{U_{s1}^q}{L_1} \\ -\frac{Rx_3}{L_3} + \frac{x_6 - x_7}{L_3} \\ \omega x_5 + \frac{u_3}{L_2} - \frac{U_{s2}^d}{L_2} \\ -\omega x_4 + \frac{u_4}{L_2} - \frac{U_{s2}^q}{L_2} \\ -\frac{x_3}{C_1} + \frac{3(u_1 x_1 + u_2 x_2)}{2C_1 x_6} \\ \frac{x_3}{C_2} - \frac{3(u_3 x_4 + u_4 x_5)}{2C_2 x_7} \end{cases} \quad (3)$$

可见, VSC-HVDC 系统是一个具有 7 个状态变量的 4 输入 4 输出的强耦合非线性系统。

根据逆系统方法对上面选取的系统输出 $Y = [y_1, y_2, y_3, y_4]^T$ 进行求导,使输出量的导数中显含输入控制量 $U = [u_1, u_2, u_3, u_4]^T$:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -\frac{Rx_3}{L_3} + \frac{x_6 - x_7}{L_3} \\ \dot{y}_1 = -\frac{Rx_3}{L_3} - \frac{(C_1 + C_2)x_3}{C_1 C_2 L_3} + \frac{3x_1 u_1}{2C_1 x_6} + \\ \frac{3x_2 u_2}{2C_1 x_6} + \frac{3(x_4 u_3 + x_5 u_4)}{2C_2 x_7} \\ \dot{y}_2 = -\omega x_1 - \frac{u_2}{L_1} + \frac{U_{s1}^q}{L_1} \\ \dot{y}_3 = \omega x_5 + \frac{u_3}{L_2} - \frac{U_{s2}^d}{L_2} \\ \dot{y}_4 = -\omega x_4 + \frac{u_4}{L_2} - \frac{U_{s2}^q}{L_2} \end{cases} \quad (4)$$

经计算可得:

$$\det\left(\frac{\partial Y_q}{\partial U^T}\right) = \det\left(\frac{\partial Y_q}{\partial U^T}\right) =$$

$$\det \begin{bmatrix} \gamma_1 & \beta & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_4 \end{bmatrix} = \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4 \neq 0$$

则由此可知向量相对阶存在,且 $\alpha = [2, 1, 1, 1]^T$ 。

$$\text{其中: } \gamma_1 = \frac{3x_1}{2C_1 x_6}, \quad \beta = \frac{3x_2}{2C_1 x_6},$$

$$\gamma_2 = \frac{-1}{L_1}, \quad \gamma_3 = \frac{1}{L_2}, \quad \gamma_4 = \frac{1}{L_2},$$

$$Y_q = [\dot{y}_1, \dot{y}_2, \dot{y}_3, \dot{y}_4]^T, \quad \alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4]^T, \quad \text{且}$$

$x_1 \neq 0, x_2 \neq 0, x_6 \neq 0, n$ 为状态变量的个数。

显然, $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 5 < n = 7$, 即该 VSC-HVDC 系统模型是可逆的。

2.3 逆系统标准形式

令 $v_1 = \dot{y}_1, v_2 = \dot{y}_2, v_3 = \dot{y}_3, v_4 = \dot{y}_4$ 作为虚拟输入,取 $z_{11} = y_1, z_{12} = \dot{y}_1, z_{21} = y_2, z_{31} = y_3,$
 $z_{41} = y_4$, 则该 VSC-HVDC 系统模型的逆系统标准形式可写为:

$$\begin{cases} \dot{z}_{11} = z_{12} \\ \dot{z}_{12} = v_1 \\ \dot{z}_{21} = v_2 \\ \dot{z}_{31} = v_3 \\ \dot{z}_{41} = v_4 \\ U = \bar{\phi}(Z, V) \end{cases} \quad (5)$$

其中: $Z = [z_{11}, z_{12}, z_{21}, z_{31}, z_{41}]^T$,

$V = [v_1, v_2, v_3, v_4]^T$, $\bar{\phi}(Z, V)$ 为逆系统表达式。

由式(5)可知, 这样将 VSC-HVDC 系统化为伪线性复合系统, 其相当于四个线性子系统组成, 即将这个复杂的多变量强耦合系统的控制转化为对四个子系统的控制。

3 VSC-HVDC 系统的控制器的设计

求得逆系统后, 则可以采用变结构控制理论设计切换函数, 实现变结构控制, 从而求得虚拟控制律 V 。同时, 由于采用了非线性强制线性化方法, 故要对虚拟控制律 V 作反变换, 以求得实际控制律 U 。

设 VSC-HVDC 系统的稳态工作点为

$$X_{\infty} = [i_{L1}^{d*}, i_{L1}^{q*}, i_{L3}^*, i_{L2}^{d*}, i_{L2}^{q*}, U_{dc1}^*, U_{dc2}^*]^T。$$

应用变结构理论对式(5)的四个线性子系统进行控制器设计, 取其滑模面分别为:

$$\begin{cases} S_1 = c(z_{11} - z_1^*) + (z_{12} - \dot{z}_1^*) = \\ \quad c(z_{11} - z_1^*) + z_{12} \\ S_2 = z_{21} - z_2^* \\ S_3 = z_{31} - z_3^* \\ S_4 = z_{41} - z_4^* \end{cases} \quad (6)$$

式中: $z_1^* = i_{L3}^*$, $z_2^* = i_{L1}^{q*}$, $z_3^* = i_{L2}^{d*}$, $z_4^* = i_{L2}^{q*}$, c 为常数。

再分别对式(6)中各滑模面求导, 得:

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = c(z_{11} - z_1^*)' + (z_{12} - \dot{z}_1^*)' = \\ \quad c\dot{z}_{11} + \dot{z}_{12} \\ \dot{S}_2 = (z_{21} - z_2^*)' = \dot{z}_{21} \\ \dot{S}_3 = (z_{31} - z_3^*)' = \dot{z}_{31} \\ \dot{S}_4 = (z_{41} - z_4^*)' = \dot{z}_{41} \end{cases} \quad (7)$$

在变结构控制中, 希望状态变量按一定的指数规律到达切换面, 故取指数趋近率如下:

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = -k_1 S_1 - \varepsilon_1 \operatorname{sgn}(S_1) \\ \dot{S}_2 = -k_2 S_2 - \varepsilon_2 \operatorname{sgn}(S_2) \\ \dot{S}_3 = -k_3 S_3 - \varepsilon_3 \operatorname{sgn}(S_3) \\ \dot{S}_4 = -k_4 S_4 - \varepsilon_4 \operatorname{sgn}(S_4) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $k_1, \varepsilon_1, k_2, \varepsilon_2, k_3, \varepsilon_3, k_4, \varepsilon_4$ 分别为大于零的常数。

则可求得虚拟控制律 V :

$$\begin{cases} v_1 = -c\dot{z}_{11} - k_1 S_1 - \varepsilon_1 \operatorname{sgn}(S_1) \\ v_2 = -k_2 S_2 - \varepsilon_2 \operatorname{sgn}(S_2) \\ v_3 = -k_3 S_3 - \varepsilon_3 \operatorname{sgn}(S_3) \\ v_4 = -k_4 S_4 - \varepsilon_4 \operatorname{sgn}(S_4) \end{cases} \quad (9)$$

然后通过反变换求实际的控制输入 U , 得到最终的控制结果为:

$$\begin{cases} u_1 = u_R^d = \frac{2C_1 U_{dc1}}{3i_{L1}^d} \left[\left(\frac{R}{L_3} - c \right) i_{L3} + \frac{(C_1 + C_2) i_{L3}}{C_1 C_2 L_3} \right. \\ \quad \left. \frac{3(i_{L2}^d u_3 + i_{L2}^q u_4)}{2C_2 U_{dc2}} - \frac{3i_{L1}^q u_2}{2C_1 U_{dc1}} - k_1 S_1 - \varepsilon_1 \operatorname{sgn}(S_1) \right] \\ u_2 = u_R^q = -\omega L_1 i_{L1}^d + U_{s1}^q + L_1 [k_2 S_2 + \varepsilon_2 \operatorname{sgn}(S_2)] \\ u_3 = u_N^d = -\omega L_2 i_{L2}^d + U_{s2}^d - L_2 [k_3 S_3 + \varepsilon_3 \operatorname{sgn}(S_3)] \\ u_4 = u_N^q = \omega L_2 i_{L2}^d + U_{s2}^q - L_2 [k_4 S_4 + \varepsilon_4 \operatorname{sgn}(S_4)] \end{cases} \quad (10)$$

4 稳定性分析

显然, 由以上分析可知, 输出方程的相对阶 $\sum_{j=1}^4 \alpha_j = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 5 < n = 7$, 即式(3)所示的系统只有部分被线性化, 其包含了 $n - \sum_{j=1}^4 \alpha_j = 7 - 5 = 2$ 个隐动态。而伪线性系统的稳定性将取决于隐动态方程的稳定性。根据文献[8]的定义, 选择隐动态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \omega x_2 - \frac{u_1}{L_1} + \frac{U_{s1}^d}{L_1} \\ \dot{x}_6 = -\frac{x_3}{C_1} + \frac{3(u_1 x_1 + u_2 x_2)}{2C_1 x_6} \end{cases} \quad (11)$$

下面分析系统在稳定运行点的镇定性问题。根据文献[8]的定义, 如果强制系统达到平衡工作点, 则式(11)中的 x_2 、 x_3 均为系统在平衡工作点的值。故当强制 VSC-HVDC 系统整流侧的功率因数为 1 时, $x_2 = 0, x_3 = i_{L3}^*$, 并作相应的变换可得:

$$\begin{cases} \frac{1}{3}L_1[x_1^2]' = -\frac{3u_1x_1}{2} + \frac{3U_{sl}^d x_1}{2} \\ C_1[x_6]' = -i_{L3}^* + \frac{3u_1x_1}{2x_6} \end{cases} \quad (12)$$

显然，在系统的稳态工作点，有 $P_1 = \frac{3U_{sl}^d i_{L1}^d}{2} = \frac{3u_R i_{L1}^d}{2}$, $i_{L3}^* = \frac{P_1}{U_{dc1}} = \frac{3u_R i_{L1}^d}{2U_{dc1}}$ ，则式(12)

中第一式右端为零，即 x_1 是稳定的；同理， x_6 也是稳定的。即，零动态方程是稳定的。

因此可知，式(5)是镇定的^[8]，说明上述反馈线性化的方法是有效的。

5 仿真分析

5.1 仿真系统的参数设置

为验证所设计的控制器的有效性，使用 MATLAB/simulink 进行仿真实验。向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统的拓扑结构如图 1 所示。取主要参数为： $L_1 = L_2 = 10 \text{ mH}$, $R = 0.375 \Omega$, $L_3 = 19.8 \text{ mH}$, $C_1 = C_2 = 6800 \mu\text{F}$ ；整流侧交流无穷大系统的额定相电压 $U_{s2} = 10 \text{ kV}$ ，无源网络交流母线相电压 $U_{s2} = 10 \text{ kV}$ ；直流侧电压设定值 $U_{dc} = 15 \text{ kV}$ ；交流母线处滤波器采用二阶高通滤波器，其参数分别为 $R_f = 1 \Omega$, $L_f = 0.1 \text{ mH}$, $C_f = 14.3 \mu\text{F}$ ；采用 SPWM 调制^[12,13]，开关频率为 5 kHz 。

所设计的变结构控制器中，参数为： $k_1 = 2000$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 1$, $k_2 = k_3 = k_4 = 6000$ ，由于仿真模型是离散系统，因此定义各个环节的采样时间为 $5 \mu\text{s}$ 。

5.2 仿真试验结果

(1) 无源侧纯阻性负荷变化

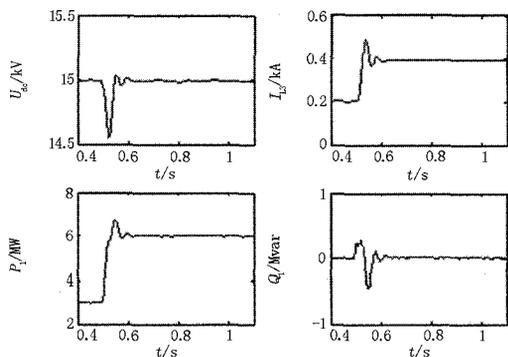


图 2 纯电阻负荷变化仿真波形

Fig.2 Simulation waveform for pure resistance load change

无源侧纯电阻负荷为 3 MW ，整流侧系统的功率因数为 1 ， 0.5 s 后，纯电阻负荷增大到 6 MW 。仿真波形如图 2 所示，其中 U_{dc} 、 I_{L3} 为 VSC-HVDC 系统的直流电压和直流电流， P_1 、 Q_1 为 VSC-HVDC 系统电源侧输入的有功和无功。从仿真图可以看出，本文所设计的控制器，可以保证有功阶跃的精确性及快速性，且调节过程中整流侧无功的波动较小。

(2) 无源侧阻感性负荷变化

无源侧阻感负荷为 3 MW ，功率因数为 0.8 ， 0.5 s 后，负荷再增加一倍。整流侧系统的功率因数为 1 。仿真波形如图 3 所示。在不同的运行工况下，系统的各个变量有良好的稳态控制精度。但此时各变量均有小幅波动，这是由于阻感负荷发生阶跃时，电感上的电流不能突变，造成负荷电流中存在一个衰减的非周期分量的缘故。

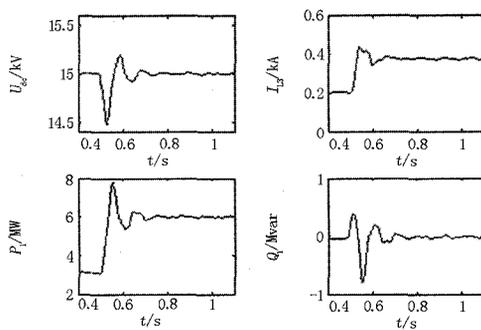


图 3 阻感性负荷变化仿真波形

Fig.3 Simulation waveform for impedance load change

(3) 无源侧三相接地故障

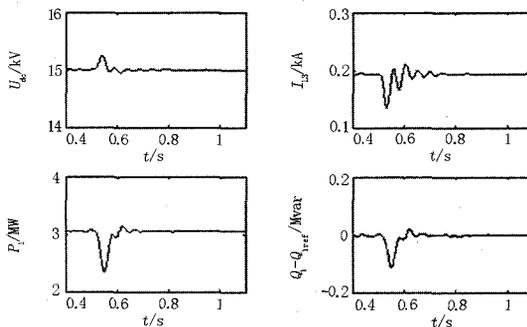


图 4 无源侧三相接地故障仿真波形

Fig.4 Simulation waveform for three-phase-to-ground of phase in passive network

无源侧纯电阻负荷为 3 MW 。整流侧系统的功率因数为 1 。无源侧 0.5 s 时，发生三相接地故障。仿真波形如图 4 所示。三相接地故障过程中，整流

站的有功、无功及直流电压、直流电流的波动较小,且很快就稳定了,这在一定程度上将整流侧的交流电网与接地故障点隔离,从而减小了无源侧短路对整流侧交流电网的冲击。

6 结束语

本文设计了向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统的基于逆系统方法的变结构控制器,并进行了仿真验证。结果表明:对 VSC-HVDC 非线性系统所采用的模型,采用逆系统线性化理论方法以强制线性化该非线性系统模型,实现大范围的全局线性化,然后使用变结构控制方法设计控制律,所得到的最终控制器具有响应快速、对参数变化及扰动不敏感、鲁棒性强等优点,使得系统在受到大扰动或负荷作较大阶跃时能快速准确地回到期望的稳态工作点。其中,整流侧控制器能够实现电流的解耦跟踪控制和有功与无功的独立调节。最后,对系统的隐动态问题进行了详细讨论,保证了控制系统的稳定性。仿真结果表明所设计的控制器能够很好地保证系统具有良好的动静态性能,达到了预先设计时的期望目标。

参考文献

- [1] Jacobson B, Fischer de Toledo P, Asplund G. 500 MV City Center Infeed with Voltage Source Converter Based HVDC[A]. In: 40th Meeting of Study Committee B4 and Colloquium on Role of HVDC, FACTS and Emerging Technologies in Evolving Power System[C]. Bangalore:2005.
- [2] Asplund G, Eriksson K, Svensson K. DC Transmission Based on Voltage Source Converters[A]. In: CIGRE SC14 Colloquium[C]. South Africa: 1997.
- [3] Sood V K. 高压直流输电与柔性交流输电控制装置——静止换流器在电力系统中的应用[M]. 徐政,译.北京:机械工业出版社,2006.
Sood V K. HVDC and FACTS Controllers——Applications of Static Converters in Power System[M]. Xu Zheng, Trans. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [4] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
XU Zheng. AC-DC Power System Dynamic Analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [5] 陈海荣,徐政. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统的控制器设计[J]. 中国电机工程学报,2006,23(26):43-48.
CHEN Hai-rong, XU Zheng. Control Design for VSC-HVDC Supplying Passive Network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 23(26):43-48.
- [6] 梁海峰,李庚银,李广凯,等. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(8):45-50.
LIANG Hai-feng, LI Geng-yin, LI Guang-kai, et al. Simulation Study of VSC-HVDC System Connected to Passive Network[J]. Power System Technology, 2005, 29(8):45-50.
- [7] 卢强,孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京:科学出版社,1992.
LU Qiang, SUN Yuan-zhang. Nonlinear Control of Power System[M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [8] 李春文,冯元琨. 多变量非线性控制的逆系统方法[M]. 北京:清华大学出版社,1991.
LI Chun-wen, FENG Yuan-kun. The Inverse System Method of Multivariable Nonlinear Control System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [9] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京:科学出版社,1996.
GAO Wei-bing. The Theory and Design Method of Variable Structure Control[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [10] Panicker K M, Ahson S I, Bhatia C M. The Transient Stabilization of a Synchronous Machine Using Variable Structure System Theory[J]. Int J Control, 1985, 42(3): 715-724.
- [11] 张桂斌,徐政,王广柱. 基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 17-22.
ZHANG Gui-bin, XU Zheng, WANG Guang-zhu. Steady-State Model and Its Nonlinear Control of VSC-HVDC System[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1):17-22.
- [12] 王兆安,黄俊,等. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
WANG Zhao-an, HUANG Jun, et al. Power Electronics Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [13] 张崇巍,张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
ZHANG Chong-wei, ZHANG Xing. PWM Rectifiers and Its Control System[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [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,(8): 48-50,58.
LI Guo-dong, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, et al. New Control of VSC-HVDC Based on the Inverse System Theory[J]. High Voltage Technology, 2005, (8):48-50,58.

收稿日期: 2007-11-07; 修回日期: 2008-02-05

作者简介:

包宗贤(1967-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统控制,电气设备调试与安装;

邹超(1983-),男,硕士研究生,从事新型直流输电以及电力系统稳定方面的研究。E-mail: willbaker@163.com