

# 含 VSC-HVDC 交直流混合系统机电暂态仿真研究

张 芳<sup>1</sup>, 李静远<sup>1</sup>, 李传栋<sup>2</sup>

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

**摘要:** 对含基于电压源型变流器的高压直流输电(VSC-HVDC)交直流混合系统进行机电暂态仿真研究。VSC-HVDC 系统的外环功率、电压控制器采用 PI 控制,以产生内环电流参考值。针对  $dq$  同步旋转坐标系下 VSC-HVDC 交流侧数学模型不能精确解耦的问题,建立基于  $\alpha\beta$  静止坐标系的 VSC-HVDC 数学模型,引入比例谐振(PR)控制改进了内环电流控制器,可以无静差跟踪内环电流信号。采用以上控制策略实现 VSC-HVDC 系统的精确解耦控制,并采用双时步仿真方法对 VSC-HVDC 系统的动态响应进行准确模拟。通过在新英格兰系统上进行仿真实验,验证了所提 VSC-HVDC 机电暂态控制模型的正确性和双时步混合仿真方法的有效性。

**关键词:** VSC-HVDC; 高压直流输电; 机电暂态; 比例谐振控制; 双时步混合仿真; 交直流混合系统

**中图分类号:** TM 721

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.02.004

## 0 引言

基于电压源型变流器的高压直流输电 VSC-HVDC(Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current)技术在世界上已得到实际应用<sup>[1]</sup>。其相对于传统直流输电技术,具有以下特点<sup>[2-5]</sup>:可独立控制有功和无功功率传输;可向弱交流电网及无源系统供电且无需站间通信;潮流反转时电压极性不变;采用脉宽调制 PWM(Pulse Width Modulation)技术,输出电压低次谐波含量减少。因此 VSC-HVDC 特别适合于大规模风力发电的并网<sup>[6-7]</sup>、城市供电和异步交流电网互联等场合。由于电力电子元件的存在,对于 VSC-HVDC 适合采用电磁暂态仿真研究其动态特性,但受仿真速度和系统规模的限制,电磁暂态仿真不适合研究大规模交直流混合系统<sup>[8-9]</sup>;而机电暂态仿真能在保证一定计算精度的情况下提高仿真速度,以模拟直流系统与交流电网之间的相互作用,因此有必要建立 VSC-HVDC 机电暂态仿真模型,深入研究 VSC-HVDC 系统的控制策略和运行特性。

目前,对于 VSC-HVDC 系统的控制策略主要分为间接控制和直接控制。间接控制即通过控制 VSC 交流侧电压基波幅值和相角来达到控制目标<sup>[9-11]</sup>,该方法结构简单,但存在电流动态响应慢的缺点。目前工业中占主导地位的直接控制通常由外环功率、电压控制和内环电流控制 2 个环构成,具有快速电流响应特性和限流能力:文献[12-16]基于比例积分 PI(Proportional Integral)控制方法在  $dq$  旋转坐标系下建立 VSC-HVDC 双环控制模型,实现独立调节有功功率(或直流电压)、无功功率(或交流电压)的目

的,该方法具有算法简单、可靠性强和易于实现的特点,但在  $dq$  旋转坐标系下,内环电流解耦控制器需添加前馈补偿以抵消 VSC 数学模型中交叉耦合项的影响,降低了控制系统的鲁棒性。文献[17-18]基于反馈线性化控制思想设计内环电流控制器,实现了  $d$ 、 $q$  分量的解耦控制。文献[19]将自抗扰控制技术引入到 VSC-HVDC 系统中,避免了控制系统对复杂数学模型的过度依赖。

比例谐振 PR(Proportional Resonant)控制在电机和光伏逆变器控制中应用较多<sup>[20-22]</sup>,文献[23-24]将 PR 控制应用于 VSC-HVDC 电磁暂态仿真,本文将 PR 控制引入 VSC-HVDC 机电暂态仿真模型中,改进了内环电流控制器的设计,可以实现系统模型的完全解耦。为详细模拟直流系统的快速动态,采用双时步混合仿真方法实现含 VSC-HVDC 交直流系统仿真,即交流系统采用隐式梯形积分法计算,而直流系统采用改进欧拉法计算;最后通过算例验证所建模型和仿真算法的正确性和有效性。

## 1 VSC-HVDC 机电暂态数学建模

### 1.1 VSC-HVDC 交流侧数学模型

本文只考虑交流系统基波分量,建立 VSC-HVDC 机电暂态模型。双端 VSC-HVDC 系统结构如图 1 所示。图中, $R_1$ 、 $R_2$  分别为联结变压器和相电抗器的等效电阻以及 VSC 内部损耗; $L_1$ 、 $L_2$  分别为联结变压器和相电抗器的等效电感; $U_{si} \angle \theta_{si}$ 、 $U_{ci} \angle (\theta_{si} + \delta_i)$  ( $i=1,2$ ) 分别为公共耦合点 PCC(Point of Common Coupling)电压、VSC 输出电压的基频分量, $\delta$  为  $U_c$  相对于  $U_s$  的移相角度; $P_{si}$ 、 $Q_{si}$ 、 $P_{ci}$  分别为交流电网侧有功、无功以及 VSC 侧有功功率; $i_{si}$  为由交流电网侧流向 VSC

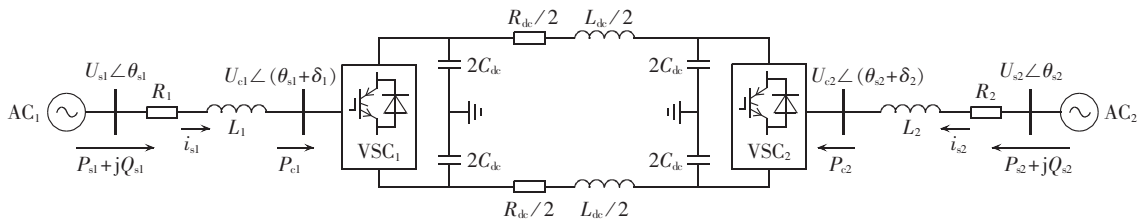


图 1 双端 VSC-HVDC 系统结构图

Fig.1 Structure of two-terminal VSC-HVDC system

的电流;  $C_{dk}$  为 VSC 直流侧电容;  $R_{dk}$ 、 $L_{dk}$  分别为直流线路的电阻、电感。

图 2 为单端 VSC 结构图,为实现 VSC-HVDC 解耦控制,首先建立  $dq$  同步旋转坐标系下 VSC 交流侧数学模型:

$$\begin{cases} L \frac{di_{sd}}{dt} = u_{sd} - u_{cd} + \omega L i_{sq} - R i_{sd} \\ L \frac{di_{sq}}{dt} = u_{sq} - u_{cq} - \omega L i_{sd} - R i_{sq} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$  分别为电网电流的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  分别为 PCC 处电网电压的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $u_{cd}$ 、 $u_{cq}$  分别为 VSC 侧基波电压的  $d$ 、 $q$  轴分量。

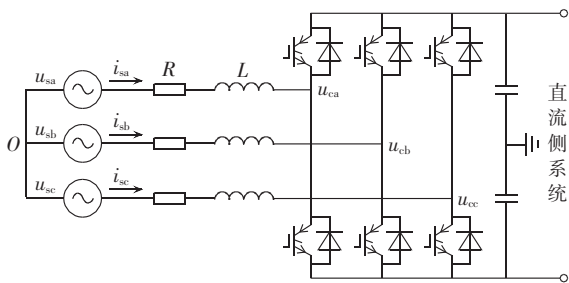


图 2 单端 VSC 结构图

Fig.2 Structure of one-terminal VSC

由式(1)可知,在同步旋转坐标系下 VSC 数学模型存在  $d$ 、 $q$  轴电流耦合项,该耦合项大小与同步旋转角频率  $\omega$  和电感参数  $L$  相关,在实际工程中,电感存在饱和现象,其电感值会随电流变化呈非线性变化,传统 PI 控制中以恒定电感参数进行补偿,无法实现电流内环的精确解耦,从而降低了控制系统的鲁棒性<sup>[20]</sup>。

现建立  $\alpha\beta$  静止坐标系下 VSC 交流侧数学模型:

$$\begin{cases} L \frac{di_{s\alpha}}{dt} = u_{s\alpha} - u_{c\alpha} - R i_{s\alpha} \\ L \frac{di_{s\beta}}{dt} = u_{s\beta} - u_{c\beta} - R i_{s\beta} \end{cases} \quad (2)$$

其中,各电压、电流量分别表示相应的  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量。可以看出,该数学模型中  $\alpha$ 、 $\beta$  轴方程分别只含有各自坐标轴上的变量,不存在电流耦合项, $\alpha$ 、 $\beta$  轴之间是完全解耦的。

## 1.2 VSC-HVDC 直流侧数学模型

VSC-HVDC 直流侧电路包括 VSC 侧直流电容

和直流线路,如图 3 所示。直流侧数学模型如下:

$$\begin{cases} C_{dk} \frac{du_{d1}}{dt} = i_{d1} - i_{dk} \\ C_{dk} \frac{du_{d2}}{dt} = i_{d2} + i_{dk} \\ L_{dk} \frac{di_{dk}}{dt} = u_{d1} - u_{d2} - R_{dk} i_{dk} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $i_{di}$ 、 $u_{di}$  ( $i=1,2$ ) 分别为两侧 VSC 直流电流和电压。因 VSC 的内部损耗在电阻  $R$  中计及,故 VSC 侧有功功率  $P_c$  等于 VSC 注入直流侧的功率  $P_{dk}$ ,因此有如下等式:

$$P_{dci} = P_{ci} = u_{c\alpha i} i_{s\alpha i} + u_{c\beta i} i_{s\beta i} \quad (4)$$

则直流侧电流为:

$$i_{di} = \frac{P_{dci}}{u_{di}} = \frac{u_{c\alpha i} i_{s\alpha i} + u_{c\beta i} i_{s\beta i}}{u_{di}} \quad (5)$$

将式(5)中的  $i_{di}$  ( $i=1,2$ ) 代入式(3)中进行计算。

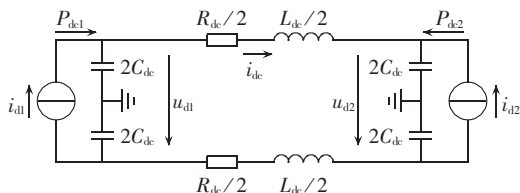


图 3 VSC-HVDC 直流侧等效电路图

Fig.3 Equivalent DC-side circuit of VSC-HVDC

## 2 VSC-HVDC 控制模型

### 2.1 基于 PR 控制的内环控制器

PR 控制器是由比例环节和广义积分 GI (Generalized Integral) 环节组成,其传递函数如下<sup>[21]</sup>:

$$G_{PR}(s) = K_p + K_r \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (6)$$

其中,  $K_p$ 、 $K_r$  分别为比例和积分时间系数;  $\omega_0$  为谐振频率。当输入信号角频率为  $\omega_0$  时,PR 控制器增益为无穷大,可以实现正弦输入信号的无静差跟踪,类似于 PI 控制的积分器在 0 Hz 处增益无穷大。

式(6)中的广义积分环节可分解为如下 2 个简单的积分器:

$$\frac{y(s)}{x(s)} = \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \Rightarrow \begin{cases} y(s) = [x(s) - v(s)]/s \\ v(s) = \omega_0^2 y(s)/s \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $x$ 、 $y$  分别为广义积分环节的输入、输出量;  $v$  为输出反馈量。为便于程序实现,式(7)可由图 4 所示

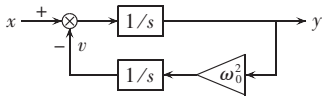


图 4 广义积分项分解示意图

Fig.4 Schematic diagram of GI decomposition

框图表示。

由上述可知,PR 控制可对角频率为  $\omega_0$  的交流信号进行无静差跟踪,因此可将 PR 控制器引入到  $\alpha\beta$  坐标系下的内环电流控制器中,如图 5 所示。

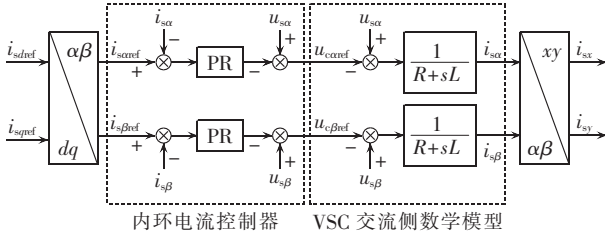


图 5 基于 PR 控制的内环电流控制器

Fig.5 Inner-loop current controller based on PR control

图 5 中,  $i_{s\alpha ref}$ 、 $i_{s\beta ref}$  分别为内环电流参考值的  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量,是由外环控制器输出的  $d$ 、 $q$  轴电流参考值  $i_{sdref}$ 、 $i_{sqref}$  经  $dq/\alpha\beta$  变换得到;  $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$  分别为内环电流的  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量;  $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$  分别为 PCC 电网电压的  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量;  $u_{s\alpha ref}$ 、 $u_{s\beta ref}$  分别为内环控制器输出的 VSC 电压参考值的  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量;  $i_{sx}$ 、 $i_{sy}$  分别为交流电网向 VSC 传输电流相量的实、虚部。现以  $\alpha$  轴为例,根据式(6)和式(7)列写内环电流控制器方程:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \omega_0^2 y \\ \frac{dy}{dt} = K_r(i_{s\alpha ref} - i_{s\alpha}) - v \\ u_{s\alpha ref} = -y - K_p(i_{s\alpha ref} - i_{s\alpha}) + u_{s\alpha} \end{cases} \quad (8)$$

再根据式(2)计算出  $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$ , 经过  $\alpha\beta/xy$  变换可得出  $i_{sx}$ 、 $i_{sy}$ , 按照图 1 所示参考方向,  $-i_{sx}$ 、 $-i_{sy}$  即为 VSC 向 PCC 的节点注入电流。

基于  $dq$  同步旋转坐标系下的传统内环电流 PI 控制器如图 6 所示<sup>[12-15]</sup>。对比图 5 和图 6 可见,基于 PR 控制的内环电流控制器能有效跟踪指定频率的

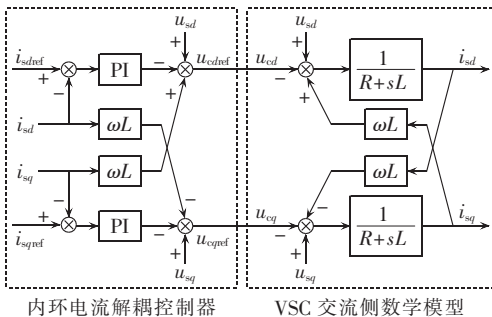


图 6 基于 PI 控制的内环电流控制器

Fig.6 Inner-loop current controller based on PI control

交流信号,设置  $\omega_0$  为电网电压基波角频率,可以实现对内环电流参考值的无静差跟踪;同时  $\alpha\beta$  坐标系下的控制器模型无交叉耦合项,因此可以实现精确解耦。

## 2.2 外环控制器

外环控制器向内环控制器提供交流侧电流的  $d$ 、 $q$  轴分量的电流参考值  $i_{sdref}$ 、 $i_{sqref}$ 。为了保持有功平衡和直流电压稳定,VSC-HVDC 必须有一侧变流器采用定直流电压控制,而另一侧变流器根据需要选择定有功、无功或交流电压控制。

### 2.2.1 有功、无功功率控制器

将 PCC 电压  $U_s$  定向于同步旋转  $d$  轴,根据瞬时功率理论,VSC 从电网吸收的有功和无功功率为:

$$\begin{cases} P_s = u_s i_{sd} \\ Q_s = -u_s i_{sq} \end{cases} \quad (9)$$

由上式可知,改变电流参考值  $i_{sdref}$ 、 $i_{sqref}$  即可分别独立地控制交流电网与 VSC-HVDC 之间传输的有功和无功功率。现采用开环和 PI 环节组合方式设计有功、无功功率控制器,控制器方程如下:

$$\begin{cases} i_{sdref} = \frac{P_{sref}}{u_s} + \left( K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s} \right) (P_{sref} - P_s) \\ i_{sqref} = -\frac{Q_{sref}}{u_s} - \left( K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s} \right) (Q_{sref} - Q_s) \end{cases} \quad (10)$$

引入新的状态变量  $N_1$ 、 $N_2$ , 其时域的微分方程如式(11)所示<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = K_{i1}(P_{sref} - P_s) \\ \frac{dN_2}{dt} = K_{i2}(Q_{sref} - Q_s) \end{cases} \quad (11)$$

则式(10)可化为:

$$\begin{cases} i_{sdref} = \frac{P_{sref}}{u_s} + K_{p1}(P_{sref} - P_s) + N_1 \\ i_{sqref} = -\frac{Q_{sref}}{u_s} - K_{p2}(Q_{sref} - Q_s) - N_2 \end{cases} \quad (12)$$

### 2.2.2 交流电压控制器

VSC-HVDC 也可采用定交流电压控制替换无功功率控制,其控制器方程如下:

$$i_{sqref} = \left( K_{p3} + \frac{K_{i3}}{s} \right) (U_{sref} - U_s) \quad (13)$$

同理引入变量  $N_3$ , 可得:

$$\frac{dN_3}{dt} = K_{i3}(U_{sref} - U_s) \quad (14)$$

$$i_{sqref} = K_{p3}(U_{sref} - U_s) + N_3 \quad (15)$$

### 2.2.3 直流电压控制器

在不考虑交流线路和 VSC 内部损耗的条件下, VSC 交直流两侧有功功率相等,有如下等式:

$$P_s = u_s i_{sd} = P_{dc} = u_d i_d \quad (16)$$

当 VSC-HVDC 两侧变流器传输的有功不平衡

时,将引起直流侧电容电压波动,控制有功电流  $i_{sd}$  向直流电容充电(或放电),可以保持直流电压  $u_d$  稳定在参考值  $u_{dref}$ 。因此根据式(16),设计如下直流电压控制器:

$$i_{sdref} = \frac{u_{dref} i_d}{u_s} + \left( K_{p4} + \frac{K_{i4}}{s} \right) (u_{dref} - u_d) \quad (17)$$

同理引入变量  $N_4$ ,其微分方程如下:

$$\frac{dN_4}{dt} = K_{i4} (u_{dref} - u_d) \quad (18)$$

则式(17)可化为:

$$i_{sdref} = \frac{u_{dref} i_d}{u_s} + K_{p4} (u_{dref} - u_d) + N_4 \quad (19)$$

### 3 VSC-HVDC 交直流系统机电暂态仿真算法

对于含 VSC-HVDC 的大型交直流系统联合仿真,一方面需要修改 PCC 对应的节点电流方程及其雅可比矩阵元素,另一方面还需要增加直流输电线路方程,因此 VSC-HVDC 系统模型的增加使得原交流系统机电暂态程序代码结构变动较大<sup>[11]</sup>。本文采用 VSC-HVDC 系统与交流系统交替求解的方法,即交流电网计算主程序与 VSC-HVDC 子程序之间交替求解。

交替求解过程中,VSC-HVDC 系统通过控制由 VSC 流入两侧 PCC 的注入电流相量实现与交流电网的相互作用。每一积分时刻交流电网主程序向 VSC-HVDC 子程序输入 PCC 电压幅值和相角,子程序依次计算外环控制器、内环控制器、VSC 数学模型及直流输电线路方程,计算 VSC-HVDC 各个状态变量和 PCC 的注入电流相量的更新值,并将注入电流相量返回交流电网主程序,求解下一积分时刻 PCC 电压。

考虑到直流系统中电感、电容的存在,为详细模拟直流系统的快速动态,VSC-HVDC 系统采用改进欧拉法进行积分计算,步长  $\Delta t = 50 \mu s$ ,改进欧拉法为显式积分方法,虽然采用小步长积分,但积分速度很快;而交流系统采用隐式梯形积分法计算,步长  $\Delta T = 0.01 s$ 。由于 VSC-HVDC 和交流系统积分方法精度均为二阶,因此当  $\Delta t \rightarrow 0$  时,其组合后的双时步混合仿真方法收敛,收敛阶为二阶<sup>[25]</sup>。采用双时步混合仿真时,需考虑小步长积分时刻母线电压的读取问题:文献[11]采用插值法,即根据  $t - \Delta T$  时刻的读取电压与  $t$  时刻的预估电压,按照主程序求解步长与子程序小步长的倍数关系等分,采用线性插值求每一个小步长积分时刻对应的电压;由于整个交流系统积分步长较小,本文假设在 VSC-HVDC 小步长仿真过程中 VSC 母线电压不变<sup>[26]</sup>。算法流程如图 7 所示。

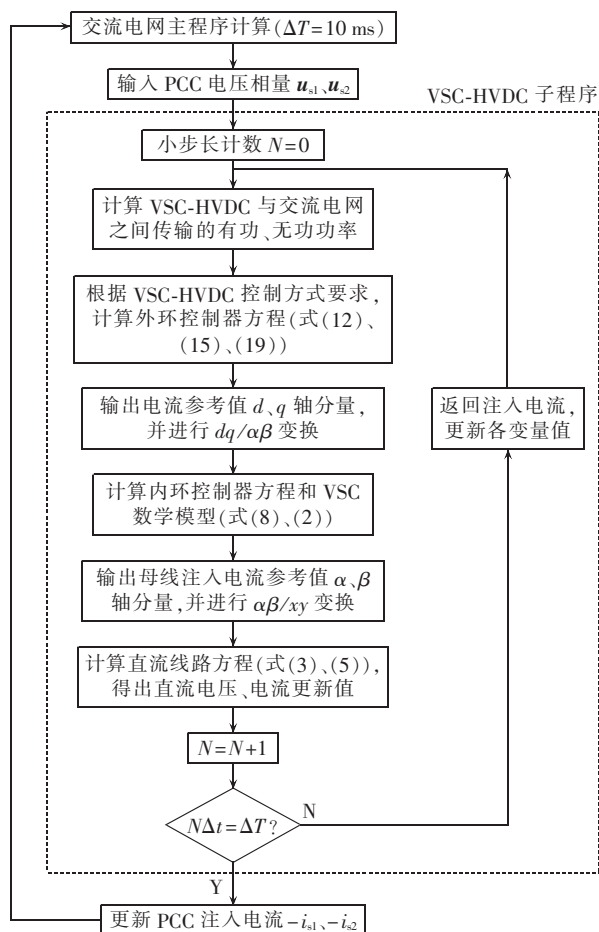


图 7 含 VSC-HVDC 交直流混合系统暂态仿真流程  
Fig.7 Flowchart of transient simulation of AC/DC hybrid system containing VSC-HVDC

### 4 VSC-HVDC 仿真分析

为验证本文所提 VSC-HVDC 控制模型的正确性,基于 PSASP/UIPI 功能编写 VSC-HVDC 子程序,在新英格兰 39 节点系统上进行仿真实验。原系统母线 14 与母线 4 之间为交流线路,现将该交流线路替换为 VSC-HVDC,如图 8 所示。母线 14 和母线 4 分别接 VSC<sub>1</sub> 和 VSC<sub>2</sub>。

VSC-HVDC 系统参数如下:基准容量  $100 MV \cdot A$ ; VSC<sub>1</sub> 侧和 VSC<sub>2</sub> 侧联结变压器的变比分别为  $230 kV/100 kV$  和  $100 kV/230 kV$ ,  $R_1 = R_2 = 0.002 p.u.$ ,  $X_1 = X_2 = 0.3 p.u.$ ;直流电压  $\pm 100 kV$ ,直流线路电阻  $R_{dc} = 5.5 \Omega$ ,电感  $L_{dc} = 64 mH$ ,电容  $C_{dc} = 160 \mu F$ 。VSC<sub>1</sub> 采用定有功  $P_{s1}$  和定无功功率  $Q_{s1}$  控制,VSC<sub>2</sub> 采用定直流电压  $U_{d2}$  和定无功功率  $Q_{s2}$  控制,分别采用本文所提的基于 PR 控制的内环控制器和图 6 所示的基于 PI 控制的内环控制器进行仿真对比,下文为表述简便,将上述 2 种方法分别简称为 PR 控制和 PI 控制,2 种方法的外环控制器相同,内、外环控制器参数分别如表 1 和表 2 所示。

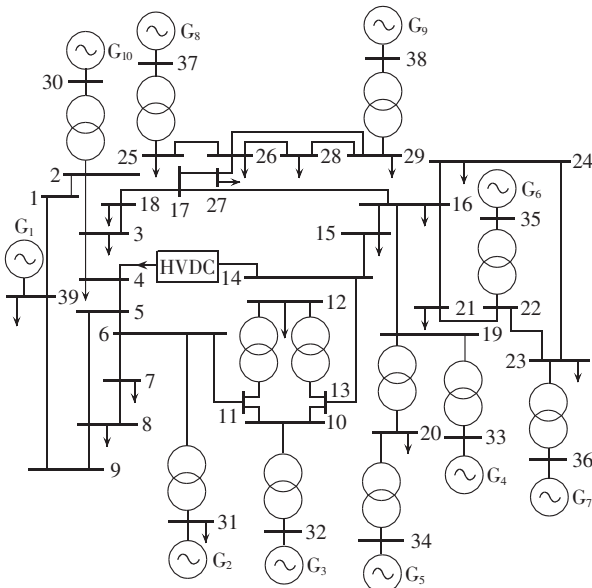


图 8 新英格兰系统图

Fig.8 Diagram of New England system

表 1 VSC-HVDC 内环控制器参数

Table 1 Parameters of VSC-HVDC inner-loop controller

参数	PR 控制	PI 控制
$K_p$	0.04	0.05
$K_i(K_i)$	0.001	0.01

表 2 VSC-HVDC 外环控制器参数

Table 2 Parameters of VSC-HVDC outer-loop controller

参数	定 $P_{s1}$ 控制	定 $Q_{s1}$ 控制	定 $U_{d2}$ 控制	定 $Q_{s2}$ 控制
$K_p$	0.1	0.1	2	0.1
$K_i$	10	10	1	10

4.1 有功功率阶跃响应

VSC<sub>2</sub> 侧直流电压参考值为 2 p.u., 两侧 VSC 传输无功功率均保持在 0; 0.5 s 时, VSC<sub>1</sub> 侧有功功率参考值由 -1 p.u. 阶跃至 -2 p.u.; 1.5 s 时, VSC<sub>1</sub> 侧有功功率参考值由 -2 p.u. 反转至 2 p.u.。图 9 给出有功、无功功率及直流电压、电流变化曲线。

由图 9 可见, VSC<sub>1</sub> 有功功率发生阶跃和潮流反转, VSC<sub>2</sub> 能根据相应的功率变化改变传输功率, 此时两侧 VSC 传输无功功率几乎无影响, 只有微小波动, 说明了 2 种方法能够实现有功、无功功率的独立控制; 采用 PR 控制和 PI 控制在有功、无功功率控制方面效果相当, 而对于直流电压控制, 由于 PR 控制中的电流内环不存在耦合项, 改善了整个控制系统鲁棒性, 因而超调量较小, 收敛速度更快。

4.2 无功功率阶跃响应

VSC<sub>1</sub> 侧有功功率参考值保持在 2.0 p.u., 0.5 s 时传输无功功率由 0 阶跃至 0.5 p.u.; VSC<sub>2</sub> 侧直流电压稳定在 2.0 p.u., 1.5 s 时无功功率由 0 阶跃至 -0.4 p.u.。有功、无功功率及 PCC 母线电压曲线如图 10 所示。

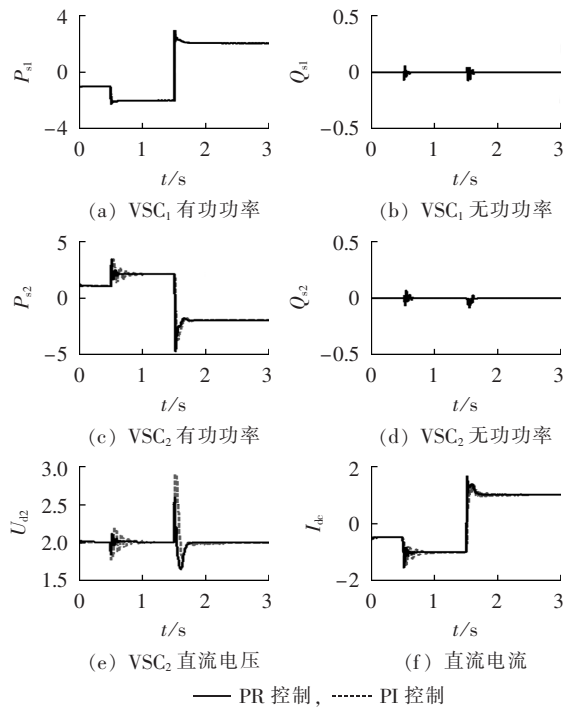


图 9 有功功率阶跃时响应

Fig.9 Response to step change of active power

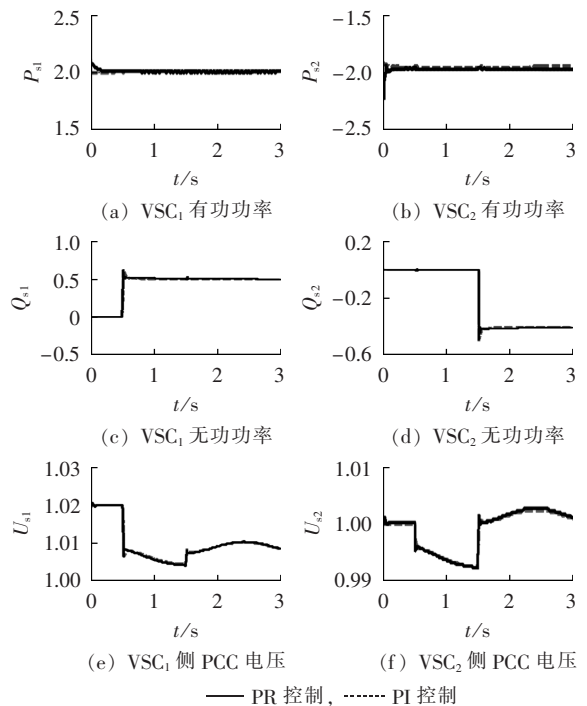


图 10 无功功率阶跃时响应

Fig.10 Response to step change of reactive power

由图 10 可知, 采用 PR 控制和 PI 控制效果基本相同: 0.5 s 时 VSC<sub>1</sub> 侧无功功率阶跃至 0.5 p.u., 表明 VSC<sub>1</sub> 从交流电网吸收无功, 因而 VSC<sub>1</sub> 侧 PCC 母线电压会有所下降; 同样 1.5 s 时 VSC<sub>2</sub> 侧无功功率阶跃至 -0.4 p.u., 表明 VSC<sub>2</sub> 向交流电网注入无功, 进而抬升 VSC<sub>2</sub> 侧 PCC 母线电压; 又由于整个系统的互联, VSC<sub>1</sub> 和 VSC<sub>2</sub> 两侧 PCC 母线电压相互影响产

生如图 10 所示同升同降的曲线变化。两侧 VSC 传输无功功率依次发生阶跃时,VSC-HVDC 与交流电网间传输的有功功率能够保持在参考值,且两侧 VSC 无功功率传输互不影响,进一步验证了采用本文所提的控制策略时 VSC-HVDC 系统能够实现有功、无功功率解耦控制,以及两侧 VSC 无功控制的相互独立。

#### 4.3 直流电压阶跃响应

VSC<sub>1</sub> 侧有功、无功功率参考值分别保持在 2.0 p.u.、0.5 p.u.,VSC<sub>2</sub> 侧无功功率参考值保持在 -0.4 p.u.。1.5 s 时,VSC<sub>2</sub> 直流电压参考值由 2.0 p.u. 阶跃到 2.2 p.u.,有功功率及直流电压、电流变化曲线如图 11 所示。

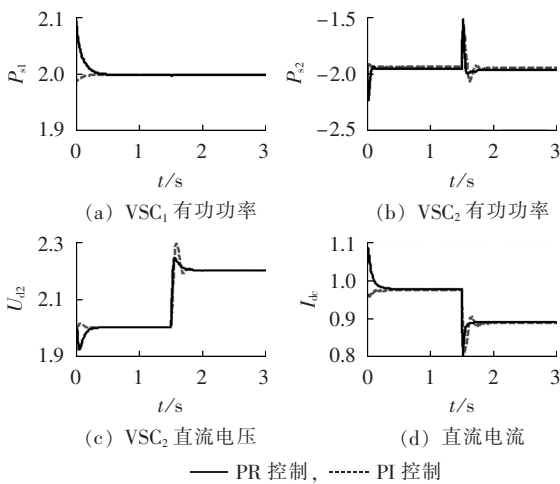


图 11 直流电压阶跃时响应

Fig.11 Response to step change of DC voltage

在 0~0.3 s 时间内系统处于起步阶段。由图 11 可知,当直流电压在 10% 内变化时,采用 PR 控制器和 PI 控制器的 VSC-HVDC 暂态模型均能使系统变量保持在参考值,但 PR 控制下直流电压收敛速度更快,超调量更小,控制效果优于 PI 控制,所得结论与 4.1 节相同。

#### 4.4 双时步混合仿真验证

VSC<sub>1</sub> 侧有功、无功功率参考值分别保持在 2.0 p.u.、0.5 p.u.,VSC<sub>2</sub> 侧无功功率、直流电压参考值分别保持在 -0.4 p.u.、2.0 p.u.。0.5 s 时图 8 中母线 5 和 6 之间联络线上母线 5 出口处发生三相短路接地故障,0.6 s 时故障消失。分别采用本文所提双时步混合仿真方法(方法 1)和文献[11]方法(方法 2)进行仿真比较。仿真曲线如图 12 所示。

由图 12 可知,0.5 s 发生故障时,VSC<sub>2</sub> 侧 PCC 电压瞬间跌落,使得 VSC-HVDC 两侧功率传输均受影响,但由于 VSC<sub>1</sub> 采用定有功功率控制,其从交流电网吸收的有功(1.91 p.u.)大于采用定直流电压控制的 VSC<sub>2</sub> 向交流电网注入的有功(0.79 p.u.),VSC<sub>2</sub>

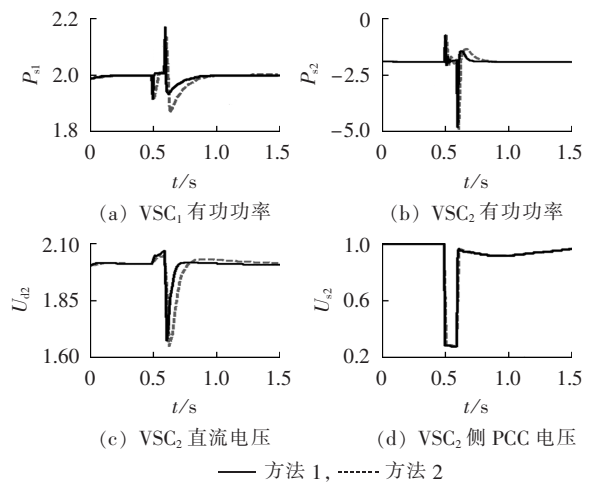


图 12 VSC-HVDC 双时步混合仿真曲线

Fig.12 Simulative curves of dual time-step simulation for VSC-HVDC

的直流电容充电使得直流电压上升。0.6 s 故障消失时,VSC<sub>2</sub> 侧 PCC 电压瞬间上升,VSC<sub>1</sub> 从交流电网吸收的有功(2.17 p.u.)小于 VSC<sub>2</sub> 向交流电网注入的有功(4.83 p.u.),VSC<sub>2</sub> 的直流电容放电使得直流电压下降。采用以上 2 种方法所得仿真曲线大致相同,均能反映交流系统发生故障时 VSC-HVDC 系统的动态响应。方法 1 的曲线收敛速度略优于方法 2,是因为方法 2 需先利用插值法对母线电压进行预估。

## 5 结论

本文建立 VSC-HVDC 交直流混合系统机电暂态仿真模型,模拟了交流电网与 VSC-HVDC 之间相互作用,以新英格兰系统为例验证了所建模型的正确性和有效性。该模型具有以下优点。

**a.** 针对 VSC-HVDC 系统在  $dq$  同步旋转坐标系下内环电流控制器不能实现精确解耦的问题,引入  $\alpha\beta$  静止坐标系下的 PR 控制改进了内环电流控制器,该控制器可以无静差跟踪交流电流信号,并实现内环电流的精确解耦。

**b.** VSC-HVDC 子程序与交流电网主程序交替求解实现交直流系统机电暂态仿真,通过控制注入电流实现交、直流系统的相互作用。采用双时步混合仿真方法详细模拟了直流系统的动态特性,既提高了仿真精度,又保持了较快的仿真速度。

## 参考文献:

- [1] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010:3-13.
- [2] 徐政,陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术,2007,33(1):1-10.
- XU Zheng,CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering,2007,33(1):1-10.
- [3] 汤广福,贺之渊,庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展

- [J]. 电力系统自动化,2013,37(15):3-14.
- TANG Guangfu,HE Zhiyuan,PANG Hui. Research application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(15):3-14.
- [4] 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 Haifeng,LI Gengyin,LI Guangkai,et al. Simulation study of VSC-HVDC system connected to passive network[J]. Power System Technology,2005,29(8):45-50.
- [5] 郑超,滕松,宋新立,等. 百万千瓦级柔性直流接入大连电网后的系统特性分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):15-19.
- ZHENG Chao,TENG Song,SONG Xinli,et al. Analysis on system characteristics after incorporation of  $\pm 320/1\ 000$  MW VSC-HVDC into Dalian Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(15):15-19.
- [6] 潘伟,李勇,曹一家,等. 用于大规模集中式风电并网的 VSC-HVDC 频率控制方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):94-99.
- PAN Wei,LI Yong,CAO Yijia,et al. Frequency control of grid-connection system based on VSC-HVDC for large-scale centralized wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(5):94-99.
- [7] 章心因,胡敏强,吴在军,等. 基于 VSC-HVDC 的风力发电系统低电压穿越协调控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):138-143.
- ZHANG Xinyin,HU Minqiang,WU Zaijun,et al. Coordinated LVRT control of wind power generation system based on VSC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):138-143.
- [8] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展[J]. 电力系统自动化,2002,26(17):66-70.
- TANG Yong. Present situation and development of power system simulation technologies[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(17):66-70.
- [9] 王冠,蔡晔,张桂斌,等. 高压直流输电电压源换流器的等效模型及混合仿真技术[J]. 电网技术,2003,27(2):4-8.
- WANG Guan,CAI Ye,ZHANG Guibin,et al. Equivalent model of HVDC-VSC and its hybrid simulation technique[J]. Power System Technology,2003,27(2):4-8.
- [10] 郑超,盛灿辉,魏强,等. VSC-HVDC 输电系统的电磁暂态建模与仿真[J]. 高电压技术,2007,33(11):94-99.
- ZHENG Chao,SHENG Canhui,WEI Qiang,et al. Electromagnetic transient modeling and simulation for VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering,2007,33(11):94-99.
- [11] 郑超. 实用柔性直流输电系统建模与仿真算法[J]. 电网技术,2013,37(4):1058-1063.
- ZHENG Chao. Study on practical modeling and simulation algorithm for VSC-HVDC power transmission[J]. Power System Technology,2013,37(4):1058-1063.
- [12] 皇甫成,汤广福,阮江军,等. VSC-HVDC 统一电磁暂态模型及其控制策略[J]. 高电压技术,2008,34(5):903-908.
- HUANG Fucheng,TANG Guangfu,RUAN Jiangjun,et al. Unified electromagnetic transient model and control strategy for the voltage source converter based HVDC transmission[J]. High Voltage Engineering,2008,34(5):903-908.
- [13] 陈海荣,张静,潘武略. 电压源换流器型直流输电系统的启动控制[J]. 高电压技术,2009,35(5):1164-1169.
- CHEN Hairong,ZHANG Jing,PAN Wulue. Start-up control of VSC based on HVDC system[J]. High Voltage Engineering,2009,35(5):1164-1169.
- [14] 刘昇,徐政,唐庚,等. VSC-HVDC 机电暂态仿真建模及仿真[J]. 电网技术,2013,37(6):1672-1677.
- LIU Sheng,XU Zheng,TANG Geng,et al. Electromechanical transient modeling and simulation for voltage source converter based HVDC power transmission[J]. Power System Technology,2013,37(6):1672-1677.
- [15] COLE S,BEERTEN J,BELMANS R. Generalized dynamic VSC MTDC model for power system stability studies[J]. IEEE Trans on Power Systems,2010,25(3):1655-1662.
- [16] 文安,邓旭,魏承志,等. 柔性直流输电系统交直流并列运行与孤岛运行方式间的切换控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):99-106.
- WEN An,DENG Xu,WEI Chengzhi,et al. Switching control between AC-DC parallel and islanded operations of VSC-HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):99-106.
- [17] 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,2006,26(23):42-48.
- CHEN Hairong,XU Zheng. Control design for VSC-HVDC supplying passive network[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(23):42-48.
- [18] 严干贵,陈涛,穆钢,等. 轻型高压直流输电系统的动态建模及非线性解耦控制[J]. 电网技术,2007,31(6):45-50.
- YAN Gangui,CHEN Tao,MU Gang,et al. Dynamic modeling and nonlinear-decouple control of HVDC light system[J]. Power System Technology,2007,31(6):45-50.
- [19] 范彬,王奔,李新宇. 基于自抗扰控制技术的 VSC-HVDC 系统控制器设计[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):65-75.
- FAN Bin,WANG Ben,LI Xinyu. Design of ADRC-based controller for VSC-HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):65-75.
- [20] 王恩德,黄声华. 表贴式永磁同步电机伺服系统电流环设计[J]. 中国电机工程学报,2012,32(33):82-88.
- WANG Ende,HUANG Shenghua. Current regulator design for surface permanent magnet synchronous motor servo systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(33):82-88.
- [21] 陈炜,陈成,宋战锋,等. 双馈风力发电系统双 PWM 变换器比例谐振控制[J]. 中国电机工程学报,2009,29(15):1-7.
- CHEN Wei,CHEN Cheng,SONG Zhanfeng,et al. Proportional-resonant control for dual PWM converter in doubly fed wind generation system[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(15):1-7.
- [22] LIU Bo,YANG Xu,ZHANG Yan,et al. A new control strategy combing PI and quasi-PR control under rotate frame for three phase grid-connected photovoltaic inverter[C]//2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE). Jeju,Korea:IEEE,2011:882-888.
- [23] HUANG Cheng,ZHAO Lihua. Design of controller for VSC-HVDC systems with the  $\alpha\beta$  stationary frame[C]//2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Shanghai,China:IEEE,2012:1-4.

- [24] 胡永银,李兴源,周洪宇,等. 应用于VSC-HVDC输电的谐波抑制控制器[J]. 电网技术,2014,38(3):583-588.  
HU Yongyin,LI Xingyuan,ZHOU Hongyu,et al. A kind of harmonic suppression controller used in VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Technology,2014,38(3):583-588.
- [25] 刘德贵,费景高. 动力学系统数字仿真算法[M]. 北京:科学出版社,2000:259-264.
- [26] BRANDT R M,ANNAKAGE U D,BRANDT D P,et al. Validation of a two-time step HVDC transient stability simulation model including detailed HVDC controls and DC line L/R dynamics[C]//2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Montreal,Canada:IEEE,2006:1-6.

## 作者简介:



张 芳

张 芳(1972—),女,内蒙古呼和浩特人,副研究员,博士,研究方向为高压直流输电研究、灵活交流输电系统控制方法(E-mail:zhangfang@tju.edu.cn);

李静远(1990—),男,河南鹤壁人,硕士研究生,研究方向为基于电压源变流器高压直流输电系统控制方法(E-mail:lijingyuan@tju.edu.cn);

李传栋(1979—),男,福建安溪人,高级工程师,博士,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定分析及规划。

## Electromechanical transient simulation of AC-DC hybrid systems containing VSC-HVDC

ZHANG Fang<sup>1</sup>,LI Jingyuan<sup>1</sup>,LI Chuandong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education,Tianjin University,Tianjin 300072,China;

2. Electric Power Research Institute of Fujian Provincial Power Co.,Ltd.,Fuzhou 350007,China)

**Abstract:** The electromechanical transient simulation is studied for the AC-DC hybrid system containing VSC-HVDC(Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current). The outer-loop power/voltage controller of VSC-HVDC applies the PI(Proportional Integral) control to generate the inner-loop current reference. Since the AC-side mathematical model of VSC-HVDC on the  $dq$  synchronous rotating coordinates cannot be accurately decoupled,its mathematical model on the  $\alpha\beta$  stationary coordinates is established and the PR(Proportional Resonant) control is introduced to the inner-loop current controller to track the inner-loop current signal with zero steady-error,which realizes the decoupled precise control of VSC-HVDC. The dual time-step method is used to accurately simulate the dynamic response of VSC-HVDC. The correctness of the VSC-HVDC electromechanical transient model and the validity of the proposed dual time-step hybrid simulation method are verified by the simulative results of New England system.

**Key words:** VSC-HVDC; HVDC power transmission; electromechanical transient; proportional resonant control; dual time-step hybrid simulation; AC-DC hybrid system

(上接第16页 continued from page 16)

## MTDC converter control based on P-DPC

JIANG Binkai<sup>1</sup>,WANG Zhixin<sup>1</sup>,LU Bin Feng<sup>2</sup>,SHI Li<sup>3</sup>

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240,China;2. Jiaying Renewable Power Electrical Co.,Ltd.,Jiaying 314031,China;

3. Shanghai Najie Electrical Plants Co.,Ltd.,Shanghai 201111,China)

**Abstract:** A simulation model of three-terminal parallel VSC-MTDC (Voltage-Source Converter based Multi-Terminal HVDC transmission) is built on MATLAB/Simulink platform,and the local controller and coordinating controller are respectively designed based on P-DPC(Predictive-Direct Power Control). When one converter station is disturbed or out of operation,the main converter station then provides the compensating power;when the main converter station reaches the upper limit of power output,a converter station with power regulation function will change its operating mode to automatically assume the power vacancy for ensuring the stable system operation. The operation of each converter station is relatively independent to improve the system stability. The simulative results show that the designed controller is simple and its control effect is better than that of traditional dual closed-loop control strategy.

**Key words:** VSC-MTDC; P-DPC; local control; coordinated control; MATLAB; stability; HVDC power transmission; control