

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.01.003

柔性直流输电系统的内模解耦控制研究

褚正超 张英敏 李兴源

(四川大学电气信息学院 四川 成都 610065)

摘要: 基于电压源型换流器的直流输电技术作为一种新型高压直流输电技术,具有很多技术优点和广阔的应用前景。在 $d-q$ 同步旋转坐标系下,电压源换流器的直流输电系统数学模型有功电流和无功电流存在耦合,利用内模控制原理对电流内环进行解耦,实现了有功功率和无功功率的独立控制,设计了电流内环控制器,并且给出了控制器参数整定的依据指标。Matlab 数字仿真结果表明,该方法可以较好地实现有功和无功的解耦控制,具有较好的动态品质和鲁棒性,验证了控制策略的正确性和有效性。

关键词: 电压源型换流器; 内模控制; 电流解耦; 动态品质

Abstract: As a new type of HVDC technology based on voltage source converter, VSC-HVDC has many technical advantages and broad application prospects. A mathematical model of VSC-HVDC system in $d-q$ synchronous rotating coordinate system is described, but the active current and the reactive current are coupling. The internal model control principle is used to achieve a decoupling of the current inner loop and the independent control of active and reactive power, the inner current loop controller is designed and the basis indicators of controller parameter setting are given. The simulation results with Matlab show that the proposed method can achieve decoupling control of active and reactive power and have good dynamic quality and robustness, which verifies the correctness and validity of the control strategy.

Key words: voltage source converter; internal model control; current decoupling; dynamic quality

中图分类号: 721.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)01-0012-06

0 前言

基于电压源型换流器的高压直流输电技术(VSC-HVDC)能工作于无源逆变,没有传统直流输电对电源的依赖,不存在换相失败的缺陷,并能够实现有功和无功的独立控制及功率的四象限运行,能够起到 STATCOM 的作用,广泛应用于可再生能源并网、分布式并网发电、孤岛供电、城市供电等领域^[1-8]。

文献[3]分析了 VSC-HVDC 的稳态模型,并提出基于 PI 的非线性控制器,但该模型给出的相关物理量间的关系较为复杂,且控制器参数不易确定。文献[4]提出对直流电压的非线性控制策略,实现了功率解耦和对正弦脉宽调制(SPWM)较好的控制,但未对功率控制进行深入的讨论。文献[9-10]提出运用内模原理设计 VSC-HVDC 的控制器,

但未给出内模控制器参数整定的依据指标。

新型直流输电技术控制系统采用双闭环控制器,即电压外环和电流内环,其中电压外环控制器跟踪系统级控制器参考信号,产生内环控制器参考信号,电流内环实现网侧电流的波形和相位控制。由于控制系统呈现强烈的非线性耦合特性,首先要对其进行解耦,利用内模控制原理对电流内环解耦,实现有功功率和无功功率的独立控制,并且给出了具体的内环控制器设计方法以及内模控制器参数整定的依据指标。内模控制只有滤波器时间常数,因而控制器参数整定简单。仿真结果表明所设计的控制器具有较好的动态品质,在系统发生干扰时具有较好的鲁棒性和抗干扰能力。

1 VSC-HVDC 原理及数学模型

图 1 为 VSC-HVDC 换流器的拓扑结构。

图 1 中 R 和 L 为系统等效电抗和损耗电阻; C 为直流侧电容; U_{sa} 、 U_{sb} 和 U_{sc} 为网侧三相电压; U_{ca} 、

基金项目: 国家自然科学基金项目(51037003); 国家电网公司大电网重大专项资助项目课题 SGCC-MPLG001-027-2012; 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB228204)

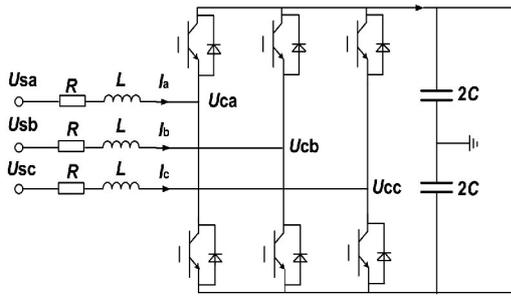


图 1 VSC-HVDC 换流器拓扑结构

U_{cb} 和 U_{cc} 为变流器侧三相电压; I_a 、 I_b 和 I_c 是变流器的三相电流 I_d 为直流电流。上述换流器数学模型在 abc 三相静止坐标系下可描述为

$$\begin{cases} L \frac{dI_a}{dt} + RI_a + \omega LI_a + U_{ca} = U_{sa} \\ L \frac{dI_b}{dt} + RI_b + \omega LI_b + U_{cb} = U_{sb} \\ L \frac{dI_c}{dt} + RI_c + \omega LI_c + U_{cc} = U_{sc} \end{cases} \quad (1)$$

为便于设计控制器,将 abc 三相静止坐标变换到 dq0 同步旋转坐标下,则有

$$\begin{cases} L \frac{dI_d}{dt} + RI_d - \omega LI_q + U_d = U_{sd} \\ L \frac{dI_q}{dt} + RI_q + \omega LI_d + U_q = U_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_d 、 I_q 为 dq0 网侧电流分量; U_{sd} 、 U_{sq} 为网侧电压分量; U_d 、 U_q 为换流器侧电压分量; 假设电网注入换流器的有功功率和无功功率分别为 P_s 和 Q_s , 则有

$$P_s = \frac{3}{2} (U_{sd} I_d + U_{sq} I_q) \quad (3)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (U_{sd} I_q - U_{sq} I_d) \quad (4)$$

2 内环电流解耦控制分析

2.1 前馈解耦控制方法

由式(2)可知,电流 I_d 、 I_q 除了受到 U_d 、 U_q 影响外,还要受到电流的耦合项 ωLI_d 、 ωLI_q 和电网电压 U_{sd} 、 U_{sq} 的影响,为消除 d、q 轴之间的电流耦合,将式(2)改写成下面的形式:

$$\begin{cases} U_d = U_{sd} - U_d^1 + \Delta U_q \\ U_q = U_{sq} - U_q^1 + \Delta U_d \end{cases} \quad (5)$$

式中: $U_d^1 = L \frac{dI_d}{dt} + RI_d$, $U_q^1 = L \frac{dI_q}{dt} + RI_q$

$$\Delta U_q = \omega LI_q, \Delta U_d = \omega LI_d$$

在式(5)中,通过引入 d、q 轴电压耦合补偿项 U_d^1 、 U_q^1 ,使非线性方程解耦,同时通过对电压 U_{sd} 、 U_{sq} 进行前馈补偿,可实现 d、q 轴电流的独立解耦。 U_d^1 、 U_q^1 分别和 I_d 、 I_q 具有一阶线性关系,可以用 PI 环节来实现,以补偿在等效电抗器上的压降。

2.2 基于内模控制原理的解耦

2.2.1 内模控制原理

内模控制是一种很实用的控制方法,其设计原理简单,参数调整明了,应用范围较广,并且可以和其他一些控制方式结合运用,如内模控制与神经网络、内模控制与模糊控制、内模控制和自适应控制、内模控制和最优控制、预测控制的结合使内模控制不断得到改进并广泛应用于工程实践中,取得了良好的效果。

图 2 为内模控制结构图^[12-14], $H(s)$ 为被控过程的数学模型, $G(s)$ 为被控过程, $C_{IMC}(s)$ 为内模控制器, $R(s)$ 、 $Y(s)$ 、 d 分别为控制系统的输入、输出、干扰信号。将图 2 进行等效为图 3, 则有

$$F(s) = \frac{G_{IMC}(s)}{1 - G_{IMC}(s)H(s)} \quad (6)$$

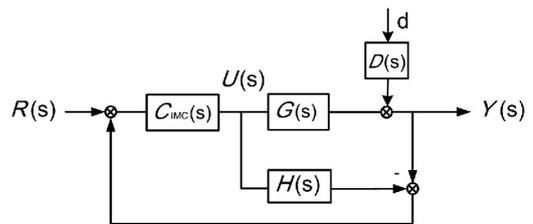


图 2 内模控制结构图

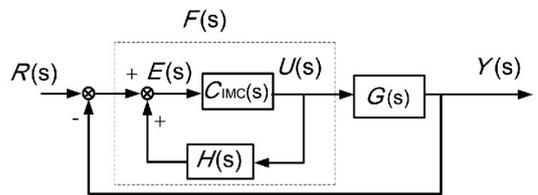


图 3 等效反馈控制结构图

由式(6)可知,等效控制器与内模 $H(s)$ 和内模控制器相关,设计内模控制器时首先将过程模型作因式分解如下:

$$H(s) = H_1(s) \times H_2(s) \quad (7)$$

$H_1(s)$ 包含了内模中所有的纯滞后环节和右半平面(RHP)零点。为简单起见,取其静态增益为 1, $H_2(s)$ 为控制模型中的最小相位部分。

然后,令内模控制为

$$C_{\text{IMC}}(s) = L(s) / H_2(s) \quad (8)$$

式中 $L(s)$ 为低通滤波器。

$$L(s) = \frac{1}{(Ts + 1)^n} \quad (9)$$

2.2.2 VSC-HVDC 内模解耦控制

设图 3 中 $U(s)$ 、 $Y(s)$ 、 $R(s)$ 分别为电压相量、电流相量、电流给定相量,即

$$U(s) = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}, Y(s) = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}, R(s) = \begin{bmatrix} I_{d\text{ref}} \\ I_{q\text{ref}} \end{bmatrix}$$

式中 $\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{sd} - U_d \\ U_{sq} - U_q \end{bmatrix}$

由式(5)得

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sL + R & -\omega L \\ \omega L & sL + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (10)$$

由于模型准确,可得

$$G(s) = \begin{bmatrix} sL + R & -\omega L \\ \omega L & sL + R \end{bmatrix}^{-1} \quad (11)$$

由式(10)可知 $H_1(s) = 1$ 则

$$H_2(s) = G(s) \quad (12)$$

由式(8)、(9)、(12) 并取 $n = 1$ 得

$$C_{\text{IMC}}(s) = G(s)^{-1}L(s) = \begin{bmatrix} sL + R & -\omega L \\ \omega L & sL + R \end{bmatrix} \times L(s) \quad (13)$$

$$F(s) = \left[I - \frac{1}{Ts + 1}I \right]^{-1} G(s)^{-1} \frac{1}{Ts + 1} = \begin{bmatrix} \frac{sL + R}{Ts} & -\frac{\omega L}{Ts} \\ \frac{\omega L}{Ts} & \frac{sL + R}{Ts} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:主对角线上元素 $(sL + R) / Ts$ 为电流控制器的传递函数;副对角元素 $\omega L / Ts$ 为内模解耦控制网络的传递函数。图 4 为内模解耦控制器,可见内模控

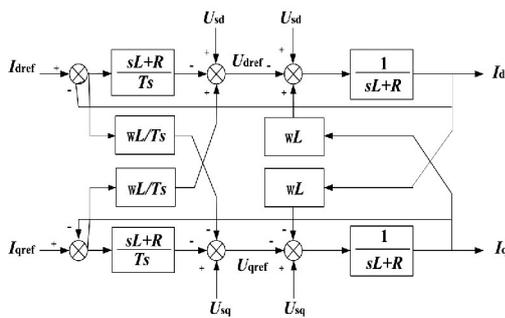


图 4 内模解耦控制器

制也为 PI 结构,调节参数只有 T ,在线调节方便。参数调整与系统的动态品质关系明确,而 T 的取值应兼顾系统的动态性能和鲁棒性综合考虑。

3 动态品质和鲁棒性分析

内模控制系统具有鲁棒稳定性的条件是^[15]:

$$|\eta(j\omega) l_m(\omega)| \leq 1 \quad (15)$$

为获取 VSC-HVDC 控制器的参数使其能够获得最优的动态响应,需要给出相应的性能指标函数。控制系统的性能指标采用绝对误差积分(integral absolute error,IAE)值评定^[16]。基于 IAE 的性能指标设计的控制器对偏差的抑制能力比较强。定义 IAE 为

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (16)$$

内模控制器滤波时间常数 T 越小,系统的动稳态性能越好; T 越大,控制系统的鲁棒稳定性越好,因而应综合考虑这两方面因素进行取值,图 5 是时间常数 T 取 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 时电流控制器传递函数 $(sL + R) / Ts$ 的伯德图。此外内模控制器滤波时间常数的取值还要综合绝对误差指标、系统鲁棒性稳定性、上升时间、调节时间、超调量指标来确定,表 1 为各指标计算结果。

结合图 5 可知,随着时间常数 T 的增大,传递函数的稳定值越小,控制系统的鲁棒稳定性越好;随着时间常数 T 的减小,系统响应可以较快地实现误差的消除达到给定值,系统的动态稳定性能越好;故对时间常数的选取不能过大也不能太小。

由表 1 中各指标可以看出,选择 $T = 0.6$ 较为合适,此时调节时间常数、上升时间都较小,相对来说系统响应快,超调小,能够同时兼顾系统动态品质和鲁棒性。

4 Matlab 系统仿真分析

基于上述 VSC-HVDC 系统模型和控制方法,采用 Simulink 对 VSC-HVDC 交流互联系统进行了仿真研究。其仿真系统图 5 所示,系统主要电气参数如表 2 所示。

此外,系统模型中的控制器参数为 $R = 0.075 \Omega$ 、 $L = 0.0239 \text{ H}$ 、 $T = 0.6 \text{ s}$ 、 $\omega = 314 \text{ rad/s}$ 。

1) 功率上升试验仿真

启动时整流侧有功功率和无功功率给定均为 0,逆变侧无功功率给定为 0,系统在 0.2 s 后直流电

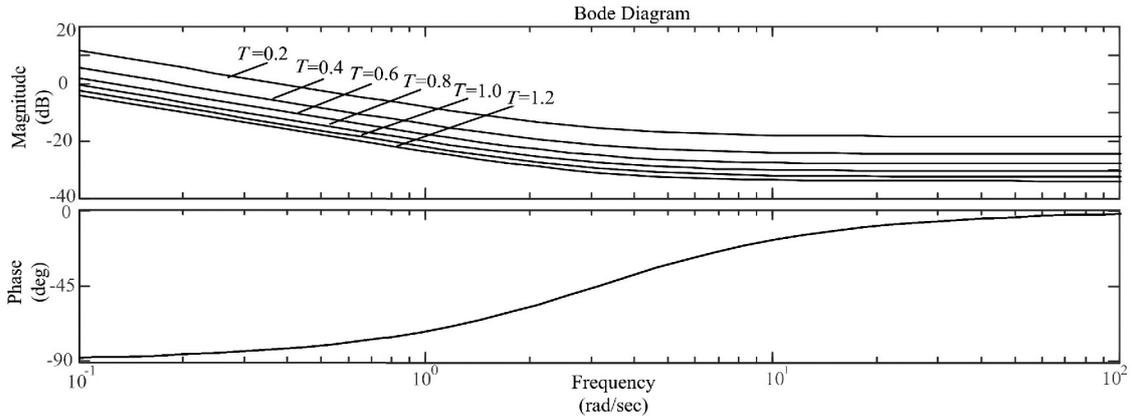


图5 电流控制器的伯德图

表1 各指标计算结果

T	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80
$IAE/10^{-2}$	6.909	7.853	7.733	8.314	8.027	8.651	8.825	9.037	9.486
t_s/ms	571.6	533.4	472.8	516.8	534.2	420.5	412.4	375.3	384.4
t_r/ms	3.703	3.704	3.778	3.704	3.704	5.185	3.560	5.111	5.185
$\sigma/\%$	27.01	26.33	26.70	26.76	26.81	26.64	23.49	20.21	20.61

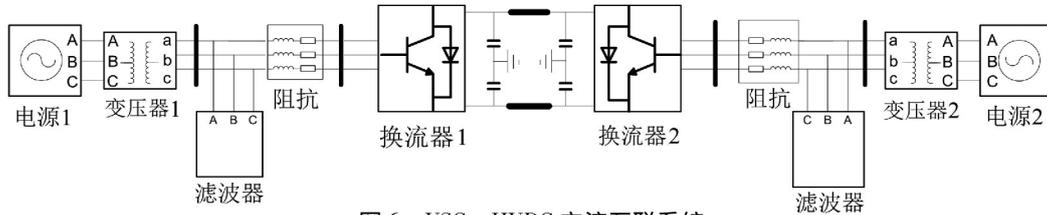


图6 VSC-HVDC 交流互联系统

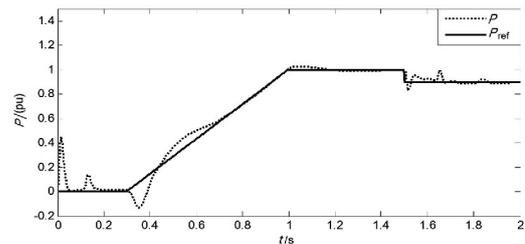
表2 VSC-HVDC 系统参数

换流站1、2侧参数	数值
额定容量/MVA	2 000
变压器变比	230 kV/100 kV
连接方式	Y/D
额定频率/Hz	50
变压器等效电抗/(pu)	0.15
换流电抗器等效电感/(pu)	0.15
损耗的等效电阻/(pu)	0.015
电缆长度/km	75
接地电容/($F \cdot km^{-1}$)	2.31×10^{-7}
直流输电电缆电阻/($\Omega \cdot km^{-1}$)	0.013 9

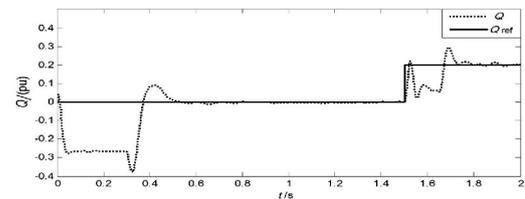
压开始达到稳定。在 0.3 s 时,整流侧有功功率斜坡上升,1 s 时达到 1 pu,无功功率不变,逆变侧有功功率 0.3 s 时开始下降,1 s 时约为 -0.9 pu,无功功率不变,1.5 s 时整流侧无功功率调整为 0.2 pu,有功功率调整为 0.9 pu,1.8 s 时逆变侧无功功率调整为 -0.2 pu,仿真结果如下。

图7、图8中,启动过程中有功功率迅速跟踪给定指令均匀地增加,1 s 时达到 1 pu,整流侧超调量小于 0.2 pu,逆变侧小于 0.4 pu。1.5 s、1.8 s 系统两端的无功功率变化时,可以看出系统对无功功率的控制和响应迅速,功率调节过程中两端的无功调

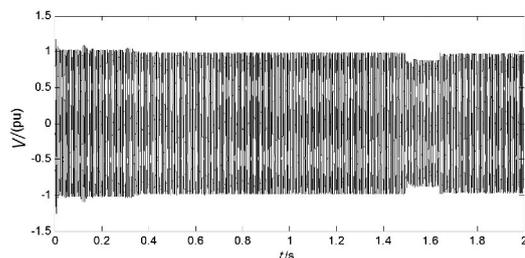
节超调量小于 0.4 pu,超调时间很短,交流侧电压稳定。直流电压快速建立,在功率调整过程中波动很



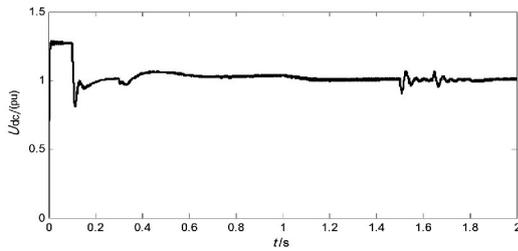
(a) 整流侧有功功率



(b) 整流侧无功功率



(c) 整流侧交流电压



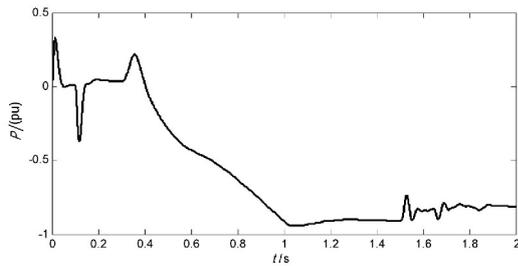
(d) 整流侧直流电压

图7 整流侧仿真结果

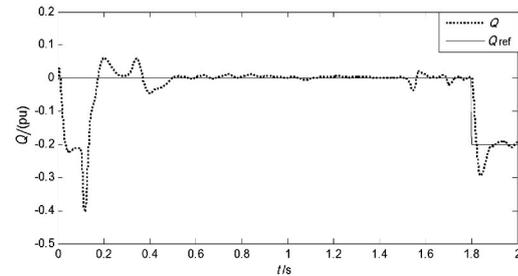
小 约为 0.1 pu。

2) 三相短路故障仿真试验

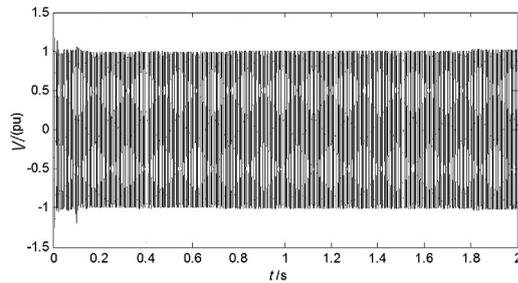
在逆变侧变压器和交流系统之间设置三相短路故障,故障 2 s 开始,持续 0.1 s,通过三相短路故障检验所设计控制器的暂态响应效果,仿真结果如图 9、图 10 所示。



(a) 逆变侧有功功率

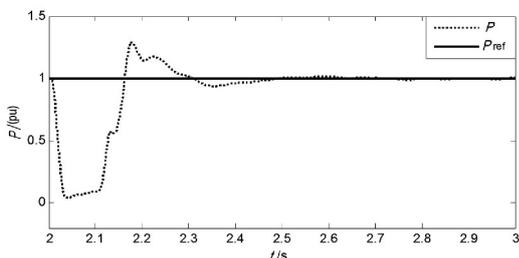


(b) 逆变侧无功功率

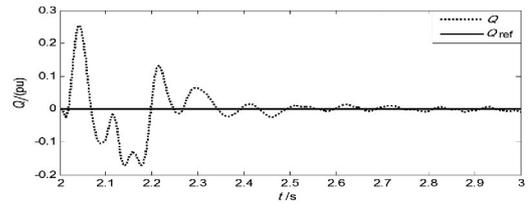


(c) 逆变侧交流母线电压

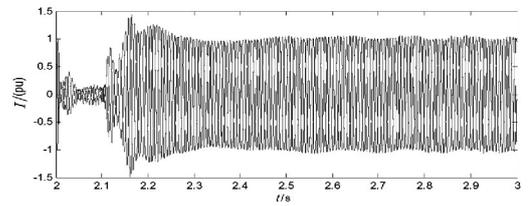
图8 逆变侧仿真结果



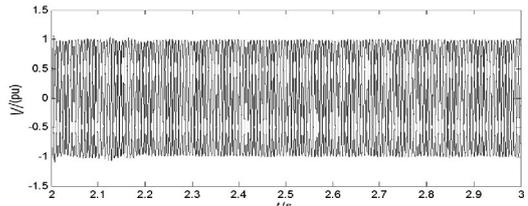
(a) 整流侧有功功率



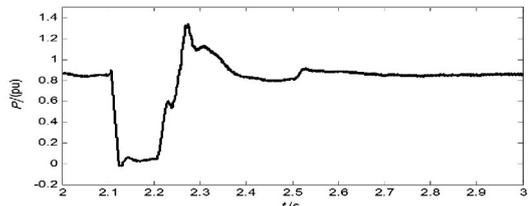
(b) 整流侧无功功率



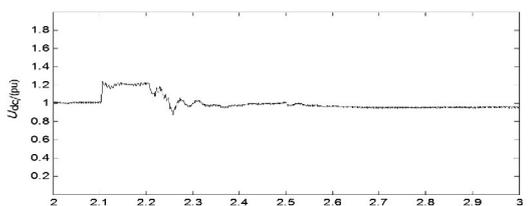
(c) 整流侧交流电流



(d) 整流侧交流电压

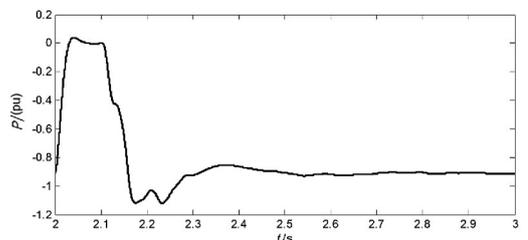


(e) 整流侧直流功率

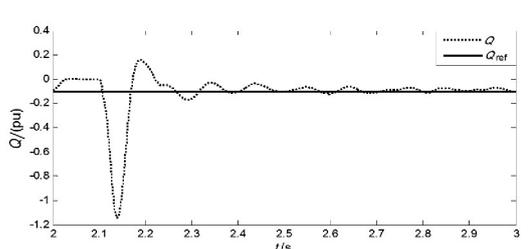


(f) 整流侧直流电压

图9 三相短路时整流侧仿真结果



(a) 逆变侧有功功率



(b) 逆变侧无功功率

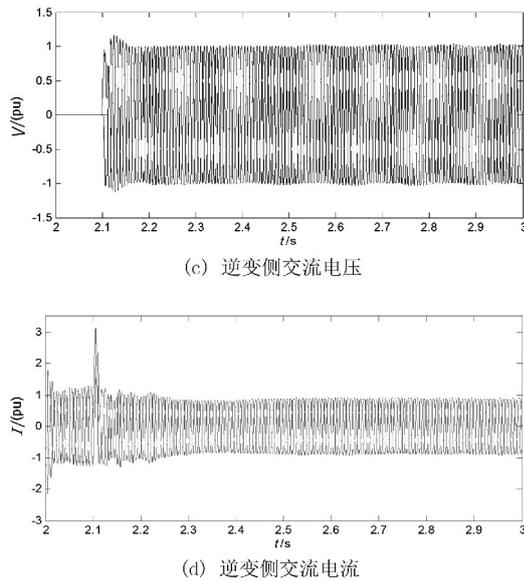


图 10 三相短路时逆变侧仿真结果

如图 9、图 10 所示,短路过程中系统的有功功率快速减小到 0,整流侧无功发生剧烈波动,直流电压波动约为 0.25 pu。故障切除后,有功功率、无功功率迅速跟踪指令,2.3 s 恢复正常,此期间逆变侧无功出现短时较大超调。直流电压在 2.3 s 也已基本达到稳定。由仿真结果可以看出,所设计的控制器能够实现快速跟踪功率给定指令和直流侧电压的稳定,两侧控制器能够达到有功和无功的独立控制。

5 结 论

在 VSC - HVDC dq0 坐标数学模型的基础上,运用内模控制原理对电流内环进行解耦,并对控制器的结构进行了设计,通过各指标来整定控制器参数使系统能够具有较好的动态品质和鲁棒性,最后对所设计的控制器进行了模拟仿真。结果表明,该方案控制效果良好,所设计的控制器具有较好响应速度,可以很好地实现有功、无功解耦控制,在外部发生扰动时具有较好的跟踪效果和抗干扰能力。

参考文献

[1] 李庚银,吕鹏飞,李广凯,等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化,2003,27(4): 77 - 80.

[2] 张桂斌,徐政. 直流输电技术的新发展[J]. 中国电力,2000,33(3): 32 - 35.

[3] 文俊,张一工,韩晓民,等. 轻型直流输电——一种新一代 HVDC 技术[J]. 电网技术,2003,27(1): 47

- 51.

[4] 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.

[5] 张建坡,赵成勇,孙一莹,等. 基于电压源换流器型直流输电拓扑结构和调制策略[J]. 电网技术,2013,37(6): 1733 - 1738.

[6] 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]. 电力系统及其自动化,2013,37(15): 3 - 14.

[7] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10): 8 - 17.

[8] 李爽,王志新,王国强. 海上风电柔性直流输电变流器 P - DPC 控制研究[J]. 电工技术学报,2013,28(2): 265 - 270.

[9] 石新春,宋红瑾,周国梁. 基于内模原理的 VSC - HVDC 控制方法研究[J]. 高压电器,2008,44(4): 304 - 307.

[10] 朱代祥,丁明. 基于内模控制的 VSC - HVDC 系统仿真研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2010,33(5): 652 - 656.

[11] 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.

[12] 刘红军,韩璞,孙海蓉,等. 基于内模控制的 PID 控制器的设计[J]. 计算机仿真,2005,22(3): 207 - 210.

[13] 何承波,刘开培,魏洪杰,等. 基于内模控制策略的自整定 PID 控制器[J]. 武汉大学学报(工学版),2002,35(2): 108 - 112.

[14] 薛定宇,陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术及应用(第 1 版)[M]. 北京: 清华大学出版社,2002.

[15] 徐应年,赵阳,谌海涛,等. 电压型逆变电源输出电压 IMC - PID 控制技术[J]. 中国电机工程学报,2007,27(28): 91 - 95.

[16] 何芝强. PID 控制器参数整定方法及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学,2005.

作者简介:

褚正超(1992),硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;

张英敏(1974),副教授、硕士生导师,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制;

李兴源(1945),教授、博士研究生导师、中国电机工程学会电力系统专委会委员、IEEE 高级会员,从事电力系统稳定与控制、高压直流输电。

(收稿日期:2015 - 11 - 24)