

基于内模原理的 VSC-HVDC 控制方法研究

石新春, 宋红瑾, 周国梁

(华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 在 d-q 同步旋转坐标系下, 基于电压源换流器的直流输电系统稳态数学模型中有功电流和无功电流存在耦合, 给控制带来困难。为了解决这一困难, 笔者在建立了该坐标系下 VSC-HVDC 数学模型的基础上, 介绍了一种基于内模原理的电流解耦策略, 给出了理论分析和调节器参数整定算法, 并利用 MATLAB 对控制策略进行了仿真。结果表明, 该方法能很好的实现电流的解耦, 它只有滤波器时间常数是需整定的参数, 方法比较简单, 并且系统特性变化的情况下具有很强的鲁棒性和抗干扰能力。
关键词: 解耦; 内模

中图分类号: TM721

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)04-0304-04

A VSC-HVDC Control Strategy Based on Internal Mold Principle

SHI Xin-chun, SONG Hong-jin, ZHOU Guo-liang

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In the simultaneously rotary d-q coordinates, the coupling of active and reactive currents in the mathematical model of VSC-HVDC brings about difficulty to control. In order to solve this problem, this paper presented a control strategy of current decoupling using internal mold principle based on the model of VSC-HVDC, and provided theoretical analysis and a parameter setting algorithm. Moreover, the proposed strategy was simulated by MATLAB. The results verifies that the method can implement decoupling control of current, and is simple because only time constant of the filter needs to be adjusted. This method shows high robustness and enhanced anti-interference capacity under variation of system characteristics.

Key words: decoupling; internal mold

0 引言

与自然换相的传统直流输电系统不同, 基于电压源换流器的新型直流输电系统采用可控关断型电力电子器件和 PWM 技术。它既可以实现有功功率和无功功率的独立控制, 又能向无源网络系统供电。因此, 新型直流输电系统在向偏远地区供电、构筑城市直流配电网等领域具有广阔的应用前景。但是新型直流输电在电流控制中呈现强烈的非线性耦合特性, 因此首先要对其进行解耦。通常采用双闭环控制, 即电压外环和电流内环控制, 其中电压外环用于控制整流器的直流电压, 电流内环实现网侧电流的波形和相位控制。

双闭环控制的控制器都是 PID 型的, 它结构简单, 易于操作, 具有强鲁棒性和有效的实际应用, 因而 PID 控制器参数的整定方法长期受过程控制界

的关注。其整定方法有许多, 如早期的 Ziegler-Nichols 闭环临界比例度法、Cohen-Coon 的开环反应曲线法以及其它一些基于最小误差积分的方法。Rivera 等人首先将内模控制的思想引入到 PID 控制器的设计中, 并建立了滤波器参数与 PID 控制器参数的关系。笔者在前人的基础上, 针对轻型直流输电中的电流内环解耦控制, 给出了基于内模控制的 PID 控制器设计方法。结果表明, 所设计的 PID 控制系统具有更好的调节品质, 在系统特性变化的情况下具有很强的鲁棒性和抗干扰能力。

文中基于内模原理的 PID 控制解耦策略, 可对电流的 d、q 分量实现解耦, 且其只有滤波器的时间常数是需整定的参数, 整定方法简单且在系统特性变化的情况下具有很强的鲁棒性和抗干扰能力。笔者首先分析了 VSC-HVDC 的数学模型^[1,2], 给出了内模控制的原理和基于内模的 PI 参数设计方法^[3-6], 最后通过 MATLAB 仿真, 验证了所采用的设

收稿日期: 2007-06-11; 修回日期: 2007-12-24

作者简介: 石新春(1950-), 男, 河北省石家庄市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动, 静止无功补偿, 滤波和高压变频技术。

计方法的正确性和可行性。

1 VSC-HVDC 系统工作原理

图1所示为简化的VSC-HVDC两端系统结构。若只考虑换流器交流侧的电压基波分量时，图中的

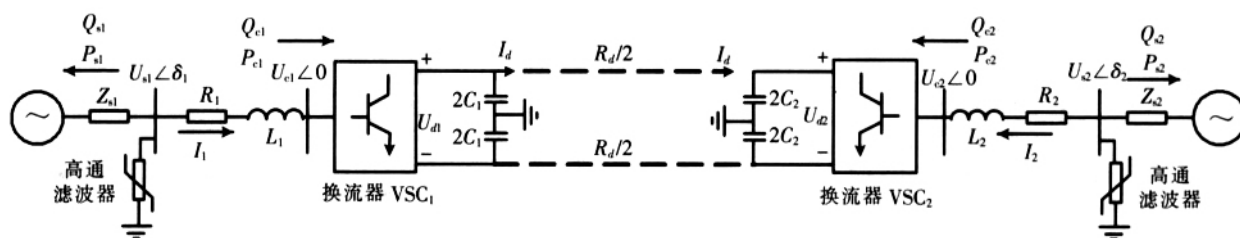


图1 VSC-HVDC 系统结构

用，交流滤波器则能滤除交流侧电压谐波。

以VSC1侧为例，在忽略电阻损耗和谐波分量后，换流器输送的有功和无功功率可表示为^[2]

$$\begin{cases} P_{s1} = \frac{U_{s1}U_{c1}}{X_1} \sin \varphi_1 \\ Q_{s1} = \frac{U_{s1}(U_{s1} - U_{c1} \cos \varphi_1)}{X_1} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中， U_{s1} 为交流母线电压； U_{c1} 为换流器交流侧的电压基波分量； φ_1 为 U_{c1} 滞后 U_{s1} 的相角； X_1 为换流电抗。

由此可知，有功功率的传输主要取决于 φ_1 ，控制 φ_1 就可以控制潮流的方向及输送功率的大小；无功功率的传输主要取决于 U_{c1} ，通过控制 U_{c1} 的大小就可以控制换流器发出的容性或感性的无功功率及其大小。

2 同步旋转坐标系下的VSC-HVDC系统换流器数学模型

事实上，图1系统两端换流器的结构与三相电压型PWM整流器相似，拓扑结构见图2。主电路采用IGBT与二极管反并联的方式，设 L_s 、 R_s 为交流侧电感参数， C 为直流滤波电容， u_{ca} 、 u_{cb} 、 u_{cc} 为整流桥三相控制电压。

对图2所示的PWM整流器，可得在三相静止坐标系下交流输入端的方程为^[1]

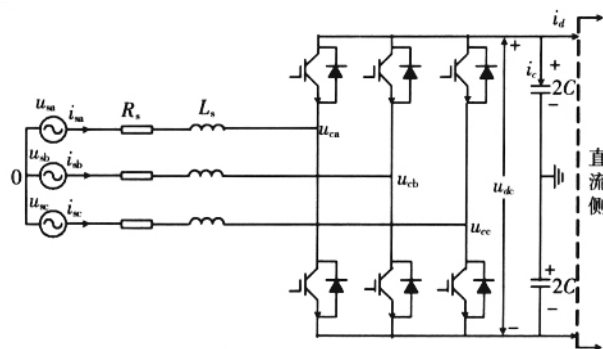


图2 三相电压型PWM整流器电路结构图

电压源换流器被简化为比例放大器；另外，换流器电抗器 L_1 和 L_2 是VSC与交流侧能量交换的纽带，同时也起到滤波器的作用， R_1 和 R_2 为换流电抗器和VSC损耗的总等效电阻， C_1 和 C_2 起直流电压支撑、缓冲桥臂关断时的冲击电流及减小直流侧谐波等作用

$$\begin{cases} u_{sd} = L_s \frac{di_{sd}}{dt} + R_s i_{sd} + u_{cd} \\ u_{sq} = L_s \frac{di_{sq}}{dt} + R_s i_{sq} + u_{cq} \\ u_{sc} = L_s \frac{di_{sc}}{dt} + R_s i_{sc} + u_{cc} \end{cases} \quad (2)$$

采用等功率坐标变换，以上方程可以变换到两相d-q旋转坐标系中

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = [T_{dq/abc}] \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$[T_{dq/abc}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos & \cos(-\frac{2}{3}) & \cos(+\frac{2}{3}) \\ \sin & \sin(-\frac{2}{3}) & \sin(+\frac{2}{3}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过以上坐标变换，得在同步旋转坐标系下PWM整流器方程为

$$\begin{cases} u_{sd} = L_s \frac{di_{sd}}{dt} + R_s i_{sd} - L_s j_{sq} + u_{cd} \\ u_{sq} = L_s \frac{di_{sq}}{dt} + R_s i_{sq} + L_s j_{sd} + u_{cq} \end{cases} \quad (5)$$

上述各式中， u_{sd} 、 u_{sq} 、 u_{cd} 、 u_{cq} 、 i_{sd} 、 i_{sq} 分别为d-q旋转坐标系下的电源电压d轴和q轴分量、桥中点控制电压d轴和q轴分量、输入交流电流的d轴和q轴分量。

将式(5)变换为以下状态方程形式

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_{sd} + i_{sq} - \frac{u_{cd}}{L_s} + \frac{u_{sd}}{L_s} \\ \frac{di_{sq}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_{sq} - i_{sd} - \frac{u_{cq}}{L_s} + \frac{u_{sq}}{L_s} \end{cases} \quad (6)$$

假设电源电压为三相对称电压，则在d-q旋转坐标系下上述各电压、电流都为直流量。通常将d轴定向于与电源电压矢量同方向上，若三相对称电源相电压最大值为 U_m 则有 $\begin{cases} u_{sd} = U_m \\ u_{sq} = 0 \end{cases}$ 。

3 内模控制原理

基于内模原理控制的结构见图3。图中 $R(S)$ 为给定输入, $C(S)$ 为系统输出, $D(S)$ 为干扰输入, $G_p(S)$ 为广义对象, $G_1(S)$ 为内模控制器, $G_2(S)$ 为内模, 可以将 $G_1(S)$ 、 $G_2(S)$ 看作是控制器的两个部分, 并得系统输出的函数如式(7)所示^[7]。

$$C(S) = \frac{G_1(S)G_p(S)}{1+G_1(S)[G_p(S)-G_2(S)]}R(S) + \frac{1-G_1(S)G_2(S)}{1+G_1(S)[G_p(S)-G_2(S)]}D(S) \quad (7)$$

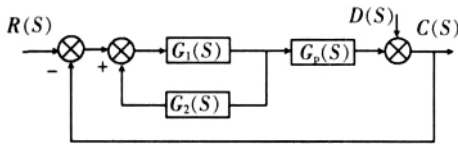


图3 内模控制系统原理图

实际中设计内模控制器时首先将过程模型作因式分解如下

$$G_2(S) = G_{2z}(S)G_2(S) \quad (8)$$

式(8)中, $G_{2z}(S)$ 包含了内模中所有的纯滞后环节和右半平面的零点, 并规定其静态增益为1, 令内模控制

$$G_1(S) = \frac{1}{G_2(S)}f \quad (9)$$

其中 $f = \frac{1}{(T_f S + 1)^r}$ 为静态增益为1的低通滤波器。 T_f 为所希望的闭环时间常数, 参数 r 为一正整数。通过选择 r 使内模控制器的分母阶次大于或等于分子的阶次, 从而使 $G_1(S)$ 是物理可实现的, 并且是稳定的。而滤波器参数 T_f 与闭环性能直接相关。该时间常数是可调整的参数, 时间常数越小, $C(S)$ 对 $R(S)$ 的跟踪滞后越小。但系统对模型误差过于敏感, 鲁棒性变差。所以就具体的系统, 滤波器时间常数的取值应在兼顾动态性能和系统的鲁棒性中折中选择。

4 基于内模控制的PID控制参数整定方法

理想的PID控制器具有如下的形式^[8]

$$G_c(S) = K_p(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S) \quad (10)$$

由图3可得虚线框内等价的反馈控制器 $G_c(S)$

与内模控制器 $G_1(S)$ 有如下关系

$$G_c(S) = \frac{G_1(S)}{1 - G_1(S)G_2(S)} \quad (11)$$

要从内模控制的角度来设计PID控制器, 只要使式(10)和式(11)等价。

将式(9)代入式(11)中可以得到

$$G_c(S) = \frac{1}{1 - \frac{G_2(S)}{G_2(S)}f} \quad (12)$$

对于对象模型 $G_p(S) = \frac{1/R}{1+(L/R)S}$ 为一阶系统,

取 $r=1$, 由于模型精确, 所以内模 $G_2(S) = G_p(S)$, 由于 $G_2(S)$ 中不包含纯滞后环节和非最小相位环节, 所以 $G_{2z}(S) = 1$ 。所以可以得出

$$G_c(S) = \frac{L}{T_f} (1 + \frac{1}{L/R} S) \quad (13)$$

可以看出, 对于该一阶系统, 基于内模控制原理设计的控制器为PI控制器, 其中

$$K_p = \frac{L}{T_f}, T_i = \frac{L}{R} \quad (14)$$

可根据式(14)确定PI控制中的参数值。滤波器时间参数的取值根据其动态性能和系统的鲁棒性中折中考虑确定。

5 系统的MATLAB仿真

为了验证控制系统设计的正确性, 笔者用MATLAB进行了仿真, 仿真结果表明根据内模原理设计的PI参数具有良好的解耦性能, 有很好的动态性能和鲁棒性。

图4、5为轻型直流输电系统送端侧和受端侧的仿真结果。系统电压 $U_s = 10.5$ kV, 系统频率 $f = 50$ Hz, 直流电压 $U_d = 25$ kV, 滤波电感 $L = 0.0117$ H, 等效电阻 $R = 0.2$, 直流电容 $C = 100$ μ F, 载波频率 $f_2 = 50$ Hz, 综合考虑取滤波器时间常数为0.02。电压环PI参数 $K_p = 4, K_i = 2000$, 电流环PI参数 $K_{ip} = 0.6, K_{ii} = 10$ 。

以下是电流给定 $i_{dref} = -0.5, i_{qref} = 0.1$ 稳态运行到 $t = 0.5$ s时改变电流给定为 $i_{dref} = 1, i_{qref} = 0.5$ 时的波形。图4表示的是送端站的波形。可以看出送端站系统

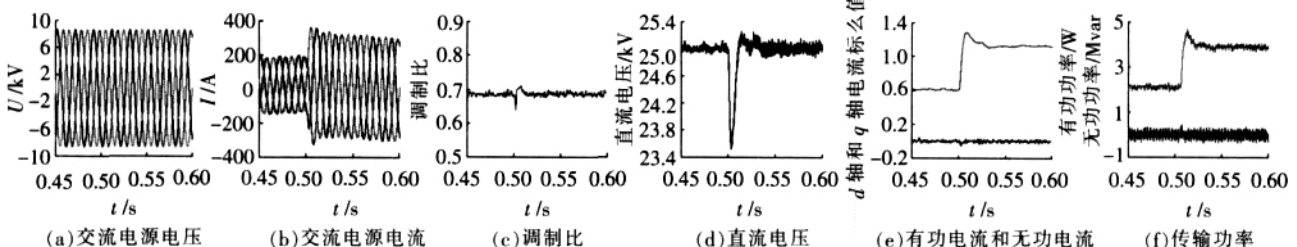


图4 送端站波形

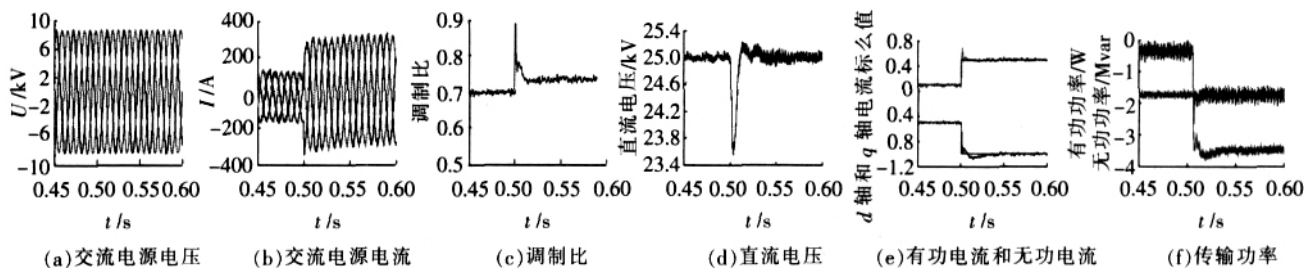


图5 受端站波形

电压电流同相位,送端站是单位功率因数运行的。图5表示的是受端站的波形。可以看到给定有功无功电流变化时电流的相位发生了变化;当负载发生变化时,直流电压能很快恢复到恒定值,表现出很好的稳定性,送端和受端的d轴和q轴电流均表现出很好的跟随性。由仿真结果知道,所设计的受端站控制器能够实现电流的快速跟踪和直流电压的稳定,送端站控制器能够达到有功无功的独立控制。

6 结语

针对VSC-HVDC解耦控制中的PI参数整定方法,笔者提出了一种基于内模原理控制算法。理论分析和实时运行结果表明,该算法参数整定简单有效,所整定的PI控制系统具有更好的调节品质;在负载特性变化的情况下具有强的鲁棒性和抗干扰能力,稳定性良好。

参考文献:

- [1] 钟炎平. 一种新的PWM整流器电流解耦控制策略[J]. 电工技术学报, 2005, 20(8): 74-77.
- [2] 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.
- [3] 刘红军, 韩璞, 孙海蓉, 等. 基于内模原理的PID控制器的设计[J]. 计算机仿真, 2004, 22(3): 207-210.
- [4] 王东风, 王剑东, 韩璞, 等. 基于内模原理的PID控制器参数整定[J]. 华北电力大学学报, 2003, 30(4): 42-46.
- [5] 谭功全, 陈永会. 内模控制器的一种简单设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2002(1): 11-15.
- [6] 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, 2002, 35(2): 108-112.
- [7] 陈夕松, 汪木兰. 过程控制系统[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [8] 张崇巍, 张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

(上接第303页)

参考文献:

- [1] GYUGYI L, STRYCULA E C. Active AC Power Filters[C]// IEEE/IAS Annual Meeting, Chicago USA, 1976: 529-535.
- [2] AKAGI H. Instantaneous Reactive Power Compensation Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components [J]. IEEE Trans. on IA, 1984, 20(3): 625-630.
- [3] AKAGI H. New Trends in Active Filter for Improving Power Quality [C]// Proceeding of 1996 International Conference on Power Electronics, Drives and Energy System for Industrial Growth, 1996: 417-425.
- [4] 李圣清, 朱英浩, 周有庆, 等. 电网谐波检测方法的综述[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 39-42.
- [5] TEY H, SO P L, CHU Y C. Improvement of Power Quality Using Adaptive Shunt Active Filter[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2005, 20(2): 1558-1568.
- [6] 曾江, 焦连伟, 倪以信, 等. 有源滤波器定频滞环电流控制新方法[J]. 电网技术, 2002, 24(6): 1-8.
- [7] 童梅, 项基. 一种混合型电力滤波器的变结构控制[J]. 电工技术学报, 2002, 17(1): 59-63.
- [8] 钟庆, 吴捷, 杨进明. 并联型有源电力滤波器的无源性控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(1): 77-80.
- [9] 周兴家, 沈沉, 梅生伟, 等. 并联型有源滤波器H控制设计[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 45-48.
- [10] 申铁龙. H控制理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [11] 俞立. 鲁棒控制-线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!