

# 在 $dq0$ 坐标系建立的 VSC-HVDC 控制策略

乔丽<sup>1</sup>, 洪伟<sup>2</sup>, 武莲<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 福建省三明市电业局, 福建 三明 365000;

3. 天津电力设计院, 天津 300381)

**摘要:** 对电压源换流器的暂态数学模型和控制策略进行了研究, 建立了  $dq0$  坐标系下 VSC-HVDC 系统的暂态数学模型, 并设计了相应的  $dq$  解耦控制器, 实现了系统有功功率和无功功率的独立调节。利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件对所设计的控制器进行了稳态和动态仿真, 结果证明所设计的控制器是正确的, 该控制器在系统稳态和动态情况下均具有良好的控制性能。

**关键词:** 电压源换流器; 暂态数学模型;  $dq0$  坐标系; 解耦控制器

## Control Strategy for VSC-HVDC Systems with the $dq0$ Reference Frame

QIAO Li<sup>1</sup>, HONG Wei<sup>2</sup>, WU Lian<sup>3</sup>

(1. North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China; 2. Sanming Power System Company,

Sanming, Fujian 365000, China; 3. Tianjin Electric Power Design Institute, Tianjin 300381, China)

**Abstract:** The mathematical model and control strategy of the VSC-HVDC system are studied. The transient mathematical model for the VSC-HVDC system in  $dq0$  reference frame is developed, and the corresponding decoupled controllers are designed to control the active and reactive powers respectively. In order to testify the proposed controllers, simulations are implemented with PSCAD/EMTDC. The results show that the control system is correct, and the proposed controllers can work well in both the steady and dynamic states.

**Key words:** voltage source converter; transient mathematical model;  $dq0$  reference frame; decoupled controllers

基于电压源换流器 (voltage source converter, VSC) 的高压直流输电 (VSC-HVDC) 是一种新型直流输电技术, 其核心是利用由全控型电力电子器件构成并基于脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 技术控制的 VSC 代替了 HVDC 中的晶闸管换流器。

近年来 VSC-HVDC 在国外得到了一系列成功的应用<sup>[1-3]</sup>, 到现在已经有多条轻型 HVDC 线路相继投入或即将投入商业运行。例如: 瑞典的 Gotland 工程、澳大利亚的 Directink 工程、丹麦的 Tjaereborg 工程、美国—墨西哥的 Eagle pass 工程等。

国内外学者在 VSC-HVDC 的运行和控制等方面进行了卓有成效的研究工作<sup>[4-6]</sup>。文献[4]提出了 VSC-HVDC 的稳态模型和基于逆模型和 PI 控制相结合的非线性控制器。文献[5]对 VSC-HVDC 的精确稳态模型进行了有功功率和无功功率的独立控制, 推导出了有功功率和无功功率的解耦控制策略。

本文在  $dq0$  坐标系下推导出了电压型换流器的暂态数学模型, 结合了逆系统和 PI 控制器的原理, 设计了相应的  $dq$  解耦控制器, 实现了系统有功功率和无功功率的独立调节。并基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件对所设计的控制器进行了两方面的仿真: 有功功率和无功功率的阶跃动态过程; 直流电压发生抬升时的动态过程。结果验证了控制系统的正确性和有效性。

## 1 VSC-HVDC 运行原理

VSC 连接有源交流网络时的稳态物理模型如图 1 所示,  $L$  为换流电抗器的等效电感;  $R$  为 VSC 功率损耗的等效电阻;  $\delta$  为交流侧系统电压相位超前 VSC 交流侧电压基波相位的角度;  $P_s$ 、 $Q_s$  为交流系统输出的有功功率和无功功率;  $P_c$ 、 $Q_c$  为 VSC 吸收的有功功率和无功功率。

假设换流电抗器是无损耗的, 即忽略电阻  $R$ ,

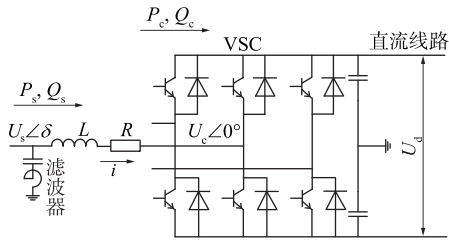


图1 VSC-HVDC 原理图

Fig.1 Principle Diagram of VSC-HVDC

并令  $X = \omega L$ 。同时忽略谐波分量, 则换流器和交流电网之间传输的有功功率  $P$  及无功功率  $Q$  分别为:

$$P = \frac{U_s U_c}{X} \sin \delta; \quad (1)$$

$$Q = \frac{U_s (U_s - U_c \cos \delta)}{X}. \quad (2)$$

式中:  $U_c$  为换流器交流侧的电压基波分量;  $U_s$  为交流系统母线电压;  $\delta$  为  $U_c$  滞后  $U_s$  的角度。

上式表明, VSC 吸收的有功功率及无功功率可以通过 PWM 调制  $\delta$  和  $U_c$  的大小来控制。

在 VSC-HVDC 系统中, 换流站主要有 3 种基本控制方式<sup>[7-8]</sup>:

- 1) 定直流电压控制方式, 控制直流母线电压和输送到交流侧的无功功率;
- 2) 定直流电流 (或功率) 控制方式, 控制直流电流 (或功率) 和输送到交流侧的无功功率;
- 3) 定交流母线电压控制方式, 只控制交流母线电压的一个量。

其中, 方式 1 和 2 适用于与有源交流网络相联的情况, 方式 3 则适用于供电无源网络的情况。

## 2 VSC-HVDC 暂态数学模型

假设图 1 中换流器工作在整流状态, 则交流侧三相动态微分方程为

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{su} \\ u_{sv} \\ u_{sw} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{cu} \\ u_{cv} \\ u_{cw} \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix}. \quad (3)$$

用相量的形式表达为

$$L \frac{d \mathbf{i}_{uvw}}{dt} = \mathbf{u}_{suvw} - \mathbf{u}_{cuvw} - R \mathbf{i}_{uvw}. \quad (4)$$

式中  $\mathbf{u}_{suvw}$  和  $\mathbf{i}_{uvw}$  已归算到换流器交流侧。

换流器采用 PWM 控制, 则换流器输出电压  $\mathbf{u}_{cuvw}$  为

$$\mathbf{u}_{cuvw} = \frac{m U_d}{2} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \delta) \\ \sin(\omega t + \delta - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + \delta + 120^\circ) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式中:  $m$  为调制度;  $\delta$  为 PWM 初始相位角。

设 Park 变换矩阵为

$$\mathbf{P} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - 120^\circ) & \sin(\omega t + 120^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由 Park 变换得  $dq0$  坐标系下交流侧三相动态微分方程为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{u_{sd} - u_{cd}}{L} - \frac{R}{L} i_d + \omega i_q, \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{u_{sq} - u_{cq}}{L} - \frac{R}{L} i_q - \omega i_d, \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} = \frac{m U_d}{2} \begin{bmatrix} \sin \delta \\ \cos \delta \end{bmatrix}. \quad (8)$$

VSC 吸收的有功无功功率可以表示为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (u_{sd} i_d + u_{sq} i_q); \\ Q = \frac{3}{2} (u_{sd} i_q - u_{sq} i_d). \end{cases} \quad (9)$$

取式 (6) 作为 Park 矩阵时,  $u_{sd} = 0$ ,  $u_{sq} = U_s$ ,  $U_s$  为系统相电压的幅值, 此时

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} U_s i_q; \\ Q = -\frac{3}{2} U_s i_d. \end{cases} \quad (10)$$

式 (10) 说明  $i_q$  与有功功率成正比,  $i_d$  与无功功率成正比。

由式 (7) 可得

$$\begin{cases} u_{cd} = u_{sd} + \omega L i_q - \left( R i_d + L \frac{di_d}{dt} \right), \\ u_{cq} = u_{sq} - \omega L i_d - \left( R i_q + L \frac{di_q}{dt} \right). \end{cases} \quad (11)$$

由式 (8) 得

$$m = \frac{2 \sqrt{u_{cd}^2 + u_{cq}^2}}{U_d}, \quad (12)$$

$$\delta = \arctan \frac{u_{cd}}{u_{cq}}. \quad (13)$$

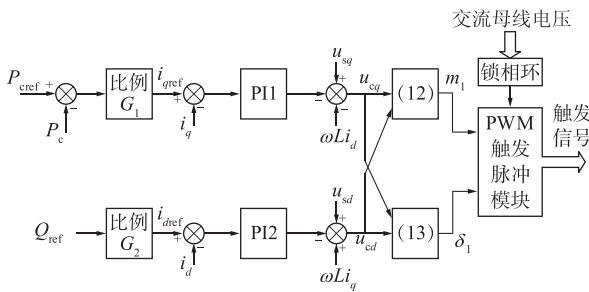
以上推导了 VSC 中的控制量  $m$ 、 $\delta$  与各变量之

间的关系。

### 3 dq解耦控制器的设计

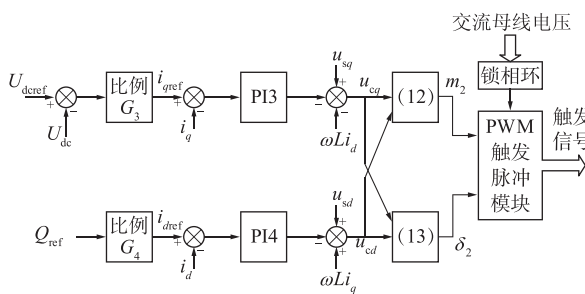
VSC-HVDC 系统中换流器交流侧输出的基波电压相角和幅值可以通过改变 PWM 调制波的相位和调制度来调节,进而控制系统输送的有功和无功功率。

根据前面我们推导的 dq0 坐标下暂态数学模型,本文提出的控制器结构如图 2 所示。图 2 (a) 实现 VSC-HVDC 系统的定有功功率和无无功功率的控制方式;图 2 (b) 实现定直流电压控制和定无功功率的控制方式。锁相环用于使 dq0 坐标系统与 abc 三相系统保持同步。



(a) 定有功功率和无无功功率

(a) Control Mode for Constant Active Power and Reactive Power



(b) 定直流电压和无无功功率

(b) Control Mode for Constant DC Voltage and Reactive Power

图 2 VSC-HVDC 控制系统图

Fig. 2 Control System Diagram of VSC-HVDC

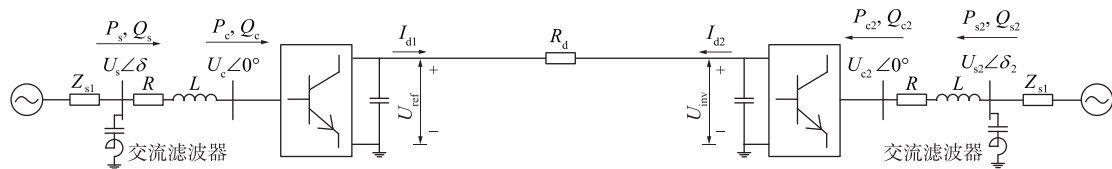


图 3 VSC-HVDC 系统图

Fig. 3 VSC-HVDC System Diagram

### 4 仿真分析及验证

利用 PSCAD/EMTDC 对所设计的解耦控制器进行仿真分析。在整流侧和逆变侧分别采用定有功功率和定直流电压的控制方式。

仿真电路如图 3 所示。系统参数如下:频率为 50 Hz,整流侧线电压  $U_s$  有效值为 13.8 kV,逆变侧线电压  $U_{s2}$  有效值为 115 kV。 $R$  为  $0.6 \Omega$ ,  $L$  为 15 mH,电容  $C$  为  $500 \mu\text{F}$ ,直流线路电阻  $R_d$  为  $5 \Omega$ ;整流变压器变比为 13.8 kV / 62.5 kV;逆变器变比为 62.5 kV / 115 kV;直流电压参考值为 120 kV;载波信号频率为 1 650 Hz。

整流侧和逆变侧两端需要控制的变量有 4 个,需要有 PI 参数  $K_i$  和  $T_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 共 4 组,分别对应整流侧有功功率控制器、整流侧无功功率控制器、逆变侧直流电压控制器和逆变侧无功功率控制器的比例和积分环节(在图 2 中以 PI1, PI2, PI3 和 PI4 表示),其中:  $K_1=0.2766$ ,  $T_1=0.2626$ ;  $K_2=0.4404$ ,  $T_2=0.0216$ ;  $K_3=0.6403$ ,  $T_3=0.0708$ ;  $K_4=0.6641$ ,  $T_4=0.0114$ 。

仿真结果如图 4 和图 5 所示。

对系统所进行的仿真实验如下:

1) 初始系统稳定运行在  $P_s=75 \text{ MW}$ ,  $Q_s=75 \text{ Mvar}$ 。 $t=1.0 \text{ s}$  时调节无功功率设定值  $Q_{sref}=50 \text{ Mvar}$ ,改变设定值后无功功率值从  $Q_s=75 \text{ Mvar}$  迅速变化到  $Q_s=Q_{sref}=50 \text{ Mvar}$ ,而且稳态误差几乎为 0;有功功率在调整过程中只发生很小的波动,稳定后依然保持  $P_s=P_{sref}=75 \text{ MW}$ 。 $t=1.5 \text{ s}$  时调节  $Q_{sref}=-50 \text{ Mvar}$ , $t=2.0 \text{ s}$  时调节  $Q_{sref}=-75 \text{ Mvar}$ 。由图 4 曲线可知,  $Q_{sref}$  的设定值发生变化后,  $Q_s$  均能够迅速达到新的设定值;而  $P_s$  则在调整过程中只出现很小的波动,随后仍然保持原来的设定值。

2)  $t=2.5 \text{ s}$  时调节有功功率设定值  $P_{sref}$  由 75 MW 变为 50 MW,改变设定值后有功功率迅速达到新的设定值  $P_s=P_{sref}=50 \text{ MW}$ ;  $Q_s$  在调整过程中

只发生很小的波动, 稳定后依然保持  $Q_s = Q_{sref} = -75$  Mvar。  $t = 3.0$  s 时调节  $P_{sref} = -50$  MW、  $t = 3.5$  s 时调节  $P_{sref} = -75$  MW。由图 4 曲线可知, 有功功率的设定值  $P_{sref}$  改变后,  $P_s$  均能够迅速达到新的设定值; 而  $Q_s$  在调整过程中只出现很小的波动, 随后依然保持原来的设定值。只是在  $P_{sref}$  的值由 50 MW 变为  $-50$  MW 时, 由于有功功率潮流反转, 其变化幅度很大,  $Q_s$  波动稍微大一点, 但很快又恢复设定值。

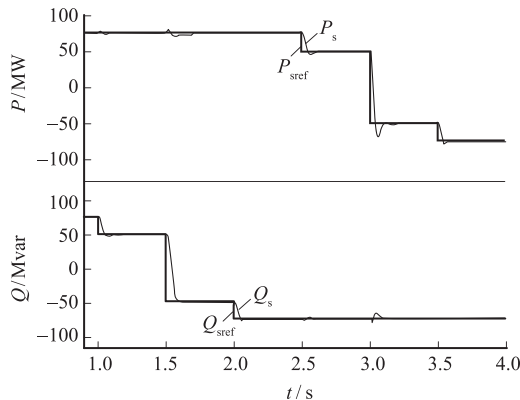


图 4 有功功率和无功功率独立控制仿真结果

Fig. 4 Simulation Results of Respective Control for Active Power and Reactive Power

3)  $t = 3$  s 时调节直流电压从 120 kV 到 140 kV。从图 5 可知, 当 VSC-HVDC 发生直流电压的抬升时, 经过大约 0.3 s 的时间, 直流电压达到稳定值。而且响应速度较快, 动态性能也比较理想。

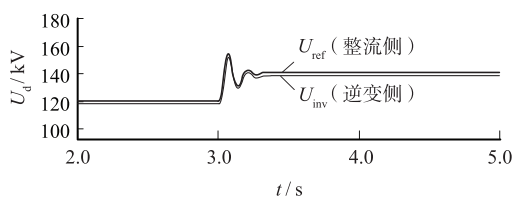


图 5 直流电压的抬升仿真结果

Fig. 5 Simulation Results of DC Voltage Lift-up

通过对以上仿真我们可以得出以下结论: 本文所设计的功率控制器能快速地响应功率指令, 稳定性较好, 可以实现有功和无功功率的独立控制。而且当抬升直流电压时, 控制系统也能以较好的响应速度和动态性能响应电压调节指令。仿真结果也说明了 PI 控制参数的有效性和鲁棒性。

## 5 结 语

基于 VSC-HVDC 的物理模型, 推导出在  $dq0$

坐标系下的暂态数学模型, 并对控制策略进行了研究。结合了逆系统和 PI 控制器的原理, 设计了相应的  $dq$  解耦控制器, 实现了系统有功功率和无功功率的独立调节。为了验证控制系统的正确性和有效性, 基于 PSCAD / EMTDC 仿真软件对所设计的控制器进行了两方面的仿真: 有功功率和无功功率的阶跃动态过程; 直流电压发生抬升时的动态过程。仿真结果证明所设计的控制器是正确的, 而且在系统稳态和动态情况下均具有良好的控制性能。上述成果可供 VSC-HVDC 稳态和动态情况下控制器的设计研究参考。

## 参考文献:

- [1] JACOBSON B, JIANG-HÄFNER Y, REY P, et al. HVDC with Voltage Source Converters and Extruded Cables for up to  $\pm 300$  kV and 1 000 MW [C]// Cigre Session 2006, Paris, France: Cigre, 2006, B4-105.
- [2] ASPLUND G. Application of HVDC Light to Power System Enhancement [C]// IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore, Jan. 23–27, 2000. New York: IEEE, 2000, 4: 2498–2503.
- [3] ANDERSEN B R, XU L, HORTON P J, et al. Topologies for VSC Transmission [J]. Power Engineering Journal, 2002, 16 (3): 142–150.
- [4] ZHANG Gui-bin, XU Zheng, GUAN Wang. A Linear and Decoupled Control Strategy for VSC Based HVDC System [C]// Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES, Atlanta, Georgia, Oct. 28 – Nov. 2, 2001. New York: IEEE, 2001, 1: 14–19.
- [5] 李金丰. 轻型直流输电控制策略及控制系统软件设计[D]. 保定: 华北电力大学, 2004.
- [6] 马国鹏, 陈鹏. VSC-HVDC 直流电压的鲁棒控制策略研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2 (4): 59–62.
- [7] 唐健, 刘天琪, 李兴源. 新型直流输电数学模型和控制方式研究综述[J]. 继电器, 2006, 34 (14): 75–80.
- [8] 李金丰, 李广凯, 赵成勇, 等. 三相电压不对称时带有电压源换流器得 HVDC 系统的控制策略[J]. 电网技术, 2005, 29 (16): 16–19.
- LI Jin-feng, LI Guang-kai, ZHAO Cheng-yong, et al. Control Strategy for VSC-HVDC System under Unsymmetry of Three Phase Voltage [J]. Power System Technology, 2005, 29 (16): 16–19.

收稿日期: 2008-12-22

作者简介:

乔丽 (1985 -), 女, 河北石家庄人。硕士研究生, 研究方向为高压直流输电等。E-mail: ljoencepu@163.com。

洪伟 (1981 -), 男。工学学士, 从事电力系统生产技术管理。

武莲 (1984 -), 女。工学学士, 从事电力系统及其自动化设计。