

基于电压源换流器 HVDC 系统稳态控制及仿真

张 凯,李庚银,梁海峰,李广凯

(华北电力大学 电气工程学院,河北 保定 071003)

摘要:对基于电压源换流器的直流输电(VSC-HVDC)系统的数学模型和有功、无功功率独立控制策略进行了研究。根据 VSC 具有 2 个控制自由度的特点,导出了 VSC-HVDC 系统的稳态数学模型,并根据相对灵敏度的概念确定了 VSC-HVDC 系统两端换流站的 4 个被控变量与相应控制变量之间的对应关系,在此基础上设计了基于 VSC-HVDC 稳态模型的控制器。仿真结果表明所设计的控制器具有良好的控制性能,为硬件实验模型的建立提供了理论指导。

关键词:电压源换流器; 直流输电; 独立控制

中图分类号: TM 721

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)03-0079-04

高压直流输电(HVDC)技术在远距离大功率输电、海底电缆送电、不同额定频率或相同额定频率交流系统之间的非同步联网等方面得到广泛的应用。基于电压源型换流器 VSC (Voltage Source Converter) 的新型直流输电技术(VSC-HVDC)采用脉宽调制(PWM)控制技术,以全控型的功率器件如 IGBT 等作为开关器件,具有可独立调节有功和无功功率的优点,可以向无源网络送电,克服了传统 HVDC 的缺陷,把 HVDC 的优势扩展到配电网^[1,2]。

1 VSC 的运行机理及稳态模型

典型的 3 相 2 电平的 VSC 结构如图 1 所示。换流器由换流桥、换流电抗器、直流电容器和交流滤波器组成。换流桥每个桥臂均由多个 IGBT 串联而成。换流电抗器是 VSC 与交流侧能量交换的纽带,同

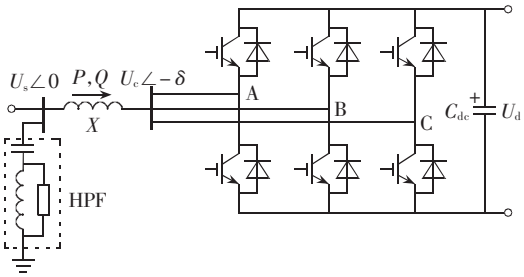


图 1 电压源型换流器

时起到滤除交流侧电流谐波的作用。直流电容器为逆变器提供电压支撑、缓冲桥臂关断时的冲击电流、减小直流侧谐波。由于 IGBT 开关频率较高,交流电压只含有少量的高次谐波,经过 1 个小容量的高通滤波器(HPF)后就可以得到很好的正弦交流电压,减少了滤波器的投资。

忽略谐波分量,换流器吸收的有功功率和感性无功功率分别为

收稿日期:2004-10-10
基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目
(20010079001)

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

$$Q = \frac{1}{X} U_s (U_s - U_c \cos \delta) \quad (2)$$

式中 U_s 为交流母线电压基波分量; U_c 为换流器输出电压的线电压基波分量; X 为换流电抗器的等效电抗; δ 为换流器输出基波电压滞后交流母线基波电压的相角。

当 VSC 采用 PWM 控制时, δ 就是 PWM 的调制波相角。 U_c 与直流电压 U_d 的关系可以表示为

$$U_c = k m U_d / \sqrt{2} \quad (3)$$

式中 k 为所选用 PWM 触发方式的直流电压利用率; m 为 PWM 的调制度, 当采用正弦脉宽调制 (SPWM) 时, m 为正弦载波峰值与三角调制波幅值的比值^[3]。

由式(1)~(3)可以看出, 当 VSC 与有源交流网络相联时是一个 2 输入(PWM 的相位与调制度)、2 输出(VSC 所发出的无功和直流电压或直流电流)、非线性、非解耦的被控对象^[4]。下面通过相对灵敏度分析给出 2 个控制量与 2 个被控量的匹配关系, 指导相应的控制器设计。

定义 $S_x^T = \frac{x}{T} \frac{\partial T}{\partial x}$ 为函数 T 对变量 x 的相对灵敏度。由式(1)(3)可得:

$$S_\delta^P = \frac{\delta}{P} \frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{\delta}{P} \frac{1}{X} U_s U_c \cos \delta = \frac{\delta \cos \delta}{\sin \delta} \quad (4)$$

$$S_m^P = \frac{m}{P} \frac{\partial P}{\partial m} = \frac{m}{P} \frac{k}{\sqrt{2} X} U_s U_d \sin \delta = 1 \quad (5)$$

由式(2)(3)可得:

$$S_m^Q = \frac{m}{Q} \frac{\partial Q}{\partial m} = -\frac{m}{Q} \frac{k}{\sqrt{2} X} U_s U_d \cos \delta = -\frac{P \cos \delta}{Q \sin \delta} \quad (6)$$

$$S_\delta^Q = \frac{\delta}{Q} \frac{\partial Q}{\partial \delta} = \frac{\delta}{Q} \frac{1}{X} U_s U_c \sin \delta = P \frac{\delta}{Q} \quad (7)$$

VSC 正常运行时, P 接近其额定值 1(标么值), Q 根据系统运行状态调节, 一般比较小, δ 以弧度表示也比较小, 接近于 0。考虑到这些具体的运行状态, 可以得到以下关系:

$$S_\delta^P \gg S_\delta^Q \quad (8)$$

$$S_m^Q \gg S_m^P \quad (9)$$

由此可见, 有功功率的传输主要取决于 δ , 通过对 δ 的控制就可以控制直流电流的方向及输送功率的大小。无功功率传输主要取决于 m , 通过控制 m 就可控制 VSC 发出或吸收无功功率及其大小。尤其当 $\delta=0$ 时 VSC 只发出无功功率, 当 $\delta=\arccos(U_s/U_c)$ 时 VSC 以单位功率因数运行。所以, VSC 不仅能提高功率因数, 而且还能起到静止同步补偿器 STATCOM(Static Compensator)的作用, 动态补偿交流母线的无功功率, 稳定交流母线电压。

2 VSC-HVDC 系统控制器设计及仿真分析

在 VSC-HVDC 系统中, 其换流站主要有以下 3 种基本控制方式:

a. 定直流电压控制, 用以控制直流母线电压和输送到交流侧的无功功率;

b. 定直流电流(或功率)控制, 用以控制直流电流(或功率)和输送到交流侧的无功功率;

c. 定交流电压控制, 仅控制交流母线电压 1 个量。

其中方式 a, b 适用于与有源交流网络相联的情况, 方式 c 适用于给无源网络供电的情况。对于一个实际的 VSC-HVDC 系统, 需有一端采用定直流电压控制, 另一端是采用定直流电流控制还是定交流电压控制则取决于所联的交流网络是有源网络还是无源网络^[4]。本文仅讨论两端均联结有源交流网络的情况, 仿真系统主电路如图 2 所示。

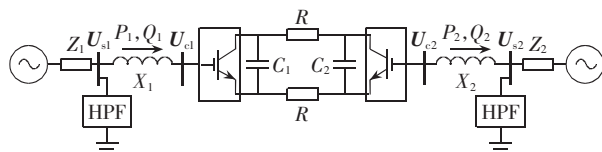


图 2 VSC-HVDC 稳态模型

Fig.2 The steady state model of VSC-HVDC

系统采用整流侧定有功功率和定无功功率控制, 逆变侧定直流电压和定交流电压控制^[5]。系统两端的 VSC 可以分别控制无功功率, 但是两侧的有功功率必须平衡^[6]。有功功率的偏差会导致直流电压的剧烈变化, 所以整流侧 VSC 对逆变侧 VSC 的影响表现在直流电压的变化上, 而逆变侧 VSC 对整流侧 VSC 的影响表现在有功功率的变化上。所以选择 m 控制整流侧无功功率和逆变侧交流电压, δ 控制整流侧有功功率和逆变侧直流电压。控制器结构如图 3 所示^[7]。其中, ref 表示被控变量的整定值; msr 表示测量值, 即控制系统反馈信号; ctr 表示控制变量; 比例环节系数在 0.1~10 之间, 积分环节时间常数在 0.01~0.1 s 范围内^[8]。

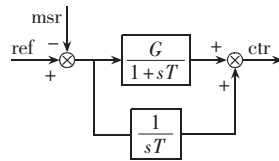


图 3 控制系统结构图

Fig.3 The structure diagram of control system

为验证所建模型的正确性和所设计控制器的有效性, 采用 PSCAD/EMTDC 软件^[9]对图 2 所示系统进行仿真研究, 系统具体参数如下: 两端交流系统标称电压 $U_{s1}=U_{s2}=110$ kV, 变压器额定容量 $S_N=100$ MV·A (选作系统功率基准值), 直流侧电容 $C_1=C_2=500$ μ F, 直流电缆长度 100 km, 逆变侧直流电压给定值 $U_d=118$ kV, IGBT 开关频率为 1 650 Hz。

仿真系统运行条件包括有功功率和无功功率整定值做不同阶跃变化, 并包括一次由正到负的潮流反转控制。仿真结果如图 4~7 所示, 图中由上到下依次为定功率控制端吸收的有功功率(P_{rec})、无功

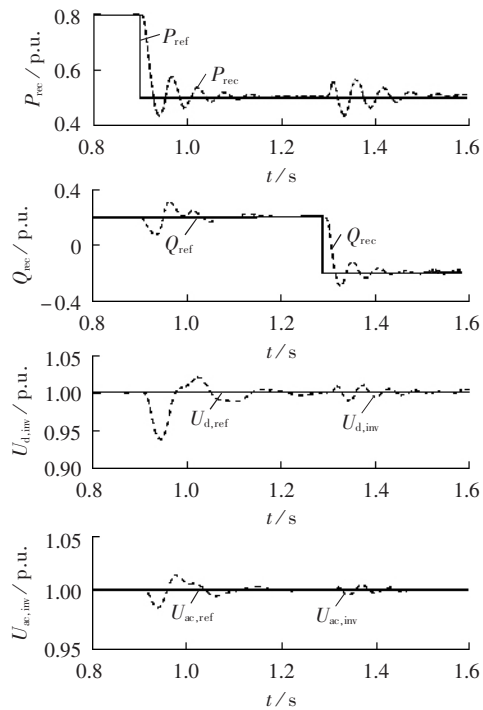


图 4 P_{ref}, Q_{ref} 分别作阶跃变化

Fig.4 Individual step change of P_{ref} or Q_{ref}

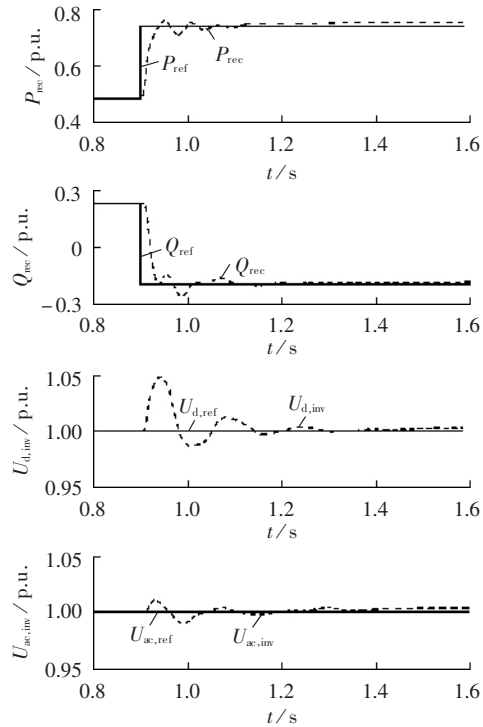


图 5 P_{ref}, Q_{ref} 同时作阶跃变化

Fig.5 Simultaneous step changes of P_{ref} and Q_{ref}
率(Q_{rec}),折线或直线为相应的整定值(P_{ref}, Q_{ref});定电压控制端的直流电压($U_{d,inv}$),交流电压有效值($U_{ac,inv}$),直线为相应的整定值。由图可见:

- a. 即使各被控量的整定值同时作阶跃变化,本文设计的控制器仍有很快的响应速度和很好的稳定性;
- b. 在不同的运行点,各被控制量都能达到较高的稳态控制精度;
- c. 所设计的控制器能在控制方式不变的条件

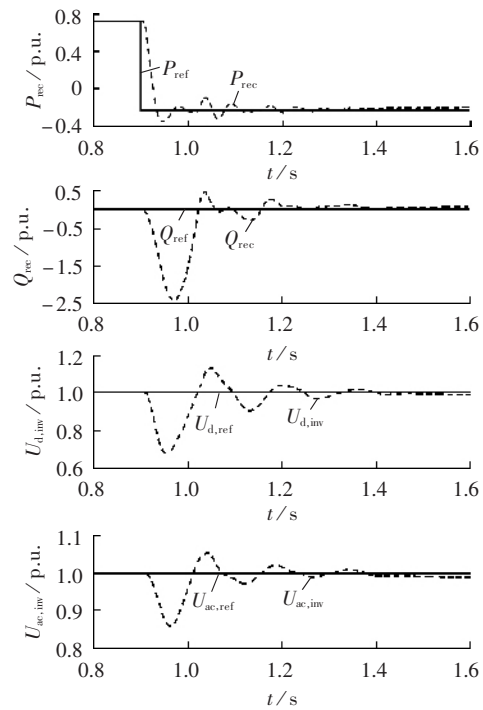


图 6 P_{ref} 作阶跃变化实现潮流反转

Fig.6 Power reversion by step change of P_{ref}

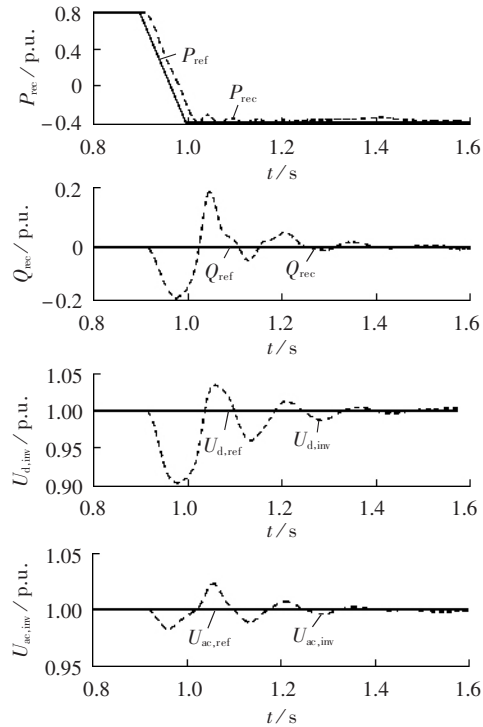


图 7 P_{ref} 按斜坡变化实现潮流反转

Fig.7 Power reversion by ramp change of P_{ref}
下实现直流潮流的快速反转;

- d. 在不同的运行状态,其控制效果略有不同,因为对于一个非线性的控制对象而言,一组 PI 参数不可能对所有运行点都是最佳的,为了取得更好的控制效果,可考虑变参数 PI 控制器;
- e. 由于比例环节只能即时地作用于控制系统的偏差,而积分环节主要用于消除静差,提高系统的无差度,系统在阶跃响应时超调较大,可以考虑在控制

系统引入微分环节来反映误差信号的变化趋势,并能在偏差信号值变得太大之前,在控制系统中引入一个有效的早期修正信号,从而加快系统的动作速度,减小调节时间。

另外,仿真结果验证了 VSC-HVDC 系统两端换流站的控制可以不需要换流站之间的通信通道,而且基于 VSC 的直流输电系统潮流反转时直流电压极性不变而直流电流方向反转,易于构成多端系统,这一点与传统的直流输电正好相反。

3 结论

本文推导了 VSC-HVDC 系统的稳态模型,并且给出了联结有源网络时,一端定有功功率,一端定直流电压控制方式下 VSC 控制量与被控量之间的合理对应关系,在此基础上设计了 VSC-HVDC 系统的稳态控制器。在 PSCAD/EMTDC 环境下的仿真结果表明,所设计的控制器具有良好的响应速度和稳态控制精度,在不同的工作点都能取得良好的控制效果,同时也证明了所建模型的正确性和所确立的控制量与被控量之间对应关系的合理性。

参考文献:

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 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.
LI Geng-yin, LÜ Peng-fei, LI Guang-kai, et al. Development and prospects for HVDC light [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(4): 77-80.
- [3] LINDBERG A, LARSSON T. PWM and control of three level voltage source converters in an HVDC back-to-back station[A]. *Sixth International Conference on AC and DC Power Transmission* [C]. Sweden: IEE, 1996. 297-302.
- [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.

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.

- [5] OOI B T, WANG X. Voltage angle lock loop control of the boost type PWM converter for HVDC application[J]. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 1990, 5(2): 229-235.

- [6] MWINYIWIWA B, WOLANSKI Z, OOI B T. Current equalization in SPMW FACTS controllers at lowest switching rates [J]. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 1999, 14(5): 900-905.

- [7] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.

- [8] 赵成勇, 张一工, 贾秀芳, 等. 直流输电控制系统参数优化[J]. 中国电力, 1999, 32(1): 32-34.

ZHAO Cheng-yong, ZHANG Yi-gong, JIA Xiu-fang, et al. Parameter optimization for DC transmission control system[J]. *Electric Power*, 1999, 32(1): 32-34.

- [9] 林良真, 叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC [J]. 电网技术, 2000, 24(1): 65-66.

LIN Liang-zhen, YE Lin. An introduction to PSCAD/EMTDC[J]. *Power System Technology*, 2000, 24(1): 65-66.

(责任编辑: 汪仪珍)

作者简介:

张凯(1980-), 男, 江苏铜山人, 硕士研究生, 研究方向为新型输配电技术(E-mail: zhangkai0603@163.com);

李庚银(1964-), 男, 河北雄县人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为电力市场、电能质量、新型输配电技术等(E-mail: ligy@ncepu.edu.cn);

梁海峰(1976-), 男, 河北保定人, 讲师, 博士研究生, 研究方向为新型输配电技术、人工智能在电力系统中的应用等(E-mail: hfliang@ncepu.edu.cn);

李广凯(1975-), 男, 山东聊城人, 博士研究生, 研究方向为新型输配电技术、电能质量等(E-mail: lgk@ncepu.edu.cn)。

Steady-state control strategy and simulation of VSC-HVDC

ZHANG Kai, LI Geng-yin, LIANG Hai-feng, LI Guang-kai

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The mathematical model and the active and reactive power independent control strategy of VSC-HVDC system is studied. According to the character that the voltage source converter has two control freedom degrees, the steady-state mathematical model is deduced, and the relationship between four controlled variables and their corresponding controlling variables are determined based on the concept of relative sensitivity, based on which the controller is designed. The simulation results verify its good performance, which provides theoretical guidance for the establishment of experimental system.

This project is supported by Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education, the State Education Ministry of China(20010079001).

Key words: voltage source converter; HVDC; independent control