

# The Direct Current Control Method and Simulation of Flexible HVDC System

Yuqiu Guan, Xiaohong Nian, Zheng Huang, Leilei Ding

School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha  
Email: 245588152@qq.com

Received: Oct. 26<sup>th</sup>, 2012; revised: Nov. 8<sup>th</sup>, 2012; accepted: Nov. 26<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** VSC-HVDC technology has small, efficient and flexible control characteristics and has become a hot spot gradually in transmit and distribute of electric power. The basis of the composition of the VSC-HVDC system structure and function are described, and established the precise mathematical model of VSC-HVDC under the dq rotating coordinate system, then proposed a direct current control strategy of the VSC-HVDC system, and built some different control models and combinations which aim to the characteristics of the VSC-HVDC system. At last, the results of simulation shows that the proposed control strategy has a simple structure, excellent dynamic and stationary performance and successfully achieved the active and reactive power control independently.

**Keywords:** DC Flexible Transmission; Direct Current Control; Simulation

## 柔性直流输电系统的直接电流控制方法与仿真

管于球, 年晓红, 黄正, 丁磊磊

中南大学信息科学与工程学院, 长沙  
Email: 245588152@qq.com

收稿日期: 2012年10月26日; 修回日期: 2012年11月8日; 录用日期: 2012年11月26日

**摘要:** 基于变流技术的柔性直流输电(VSC-HVDC)系统具有小型、高效、控制灵活等特点, 已成为当前输配电领域的研究热点之一。本文阐述了柔性直流输电系统的结构及其功能, 建立了 d-q 旋转坐标系下精确的 VSC-HVDC 数学模型, 提出了柔性直流输电系统的直接电流控制方法, 并针对柔性直流输电系统的特点, 构建了不同的控制模式及其组合。仿真结果表明, 所提出的控制方法结构简单, 具有良好的动静态性能, 成功实现了有功功率和无功功率的独立控制。

**关键词:** 直流柔性输电; 直接电流控制; 仿真

### 1. 引言

随着风能、太阳能等可再生能源开发规模的不断扩大, 其固有的分散性、小型性、远离负荷中心等特点不断突显出来。基于变流技术的柔性直流输电技术具有小型、高效、控制灵活等特点, 经济效益和环保价值可观, 并能有效地减少输电线路电压降落和闪变, 提高电能质量。

自从上世纪五十年代 ABB 公司的高压直流输电

(High-Voltage Direct Current, HVDC)工程在瑞士投入商业运行以来, HVDC 输电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联结等场合得到了广泛地应用。

随着电力半导体技术, 尤其是绝缘栅双极晶体管(IGBT)的快速发展, 在 HVDC 中采用以全控型器件为基础的电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)的条件已经具备。1990年, McGill 大学的 Boon-Teck

Ooi 等首先提出了利用 PWM 控制的 VSC 进行直流输电的概念<sup>[1]</sup>。新一代的 HVDC 输电技术(VSC-HVDC), 是以全控型、可关断器件构成的电压源换流器(VSC)以及脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)控制技术为基础的新型输电技术。换流器中全控型器件代替半控型的晶闸管, 使得 VSC-HVDC 输电具有对其传输有功功率和无功功率进行同时控制的能力, 以及可实现对交流无源网路供电等众多优点。VSC-HVDC 输电技术克服了传统 HVDC 输电技术的不足, 并扩展了直流输电的应用领域。为了区别传统上基于可控硅的 HVDC 系统和基于 FACTS 技术的灵活交流输电系统, 国内专家学者建议把这种基于 VSC 的 HVDC 系统称为柔性直流输电系统(VSC-HVDC or HVDC Flexible)<sup>[2,3]</sup>。

本文首先简要概述了柔性直流输电系统的结构及其功能, 其次建立了 d-q 旋转坐标系下精确的 VSC-HVDC 数学模型, 提出了柔性直流输电系统的矢量控制方法, 并针对柔性直流输电系统的特点, 构建了不同的控制模式及其组合。仿真结果表明, 所提出的控制方法结构简单, 具有良好的动静态性能, 成功实现了有功功率和无功功率的独立控制。

## 2. VSC-HVDC 系统的基本原理和数学模型

传统的高压直流输电技术采用的是无自关断能力的低频晶闸管所组成的电网换相换流器来进行换流, 而柔性直流输电技术(VSC-HVDC)采用的是具有自关断能力的高频电子器件来进行换流。新一代的 HVDC 输电技术, 是以全控型、可关断器件构成的电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)为基础。换流器中全控型器件代替半控型晶闸管, 使得 VSC-

HVDC 输电系统具备对其传输有功功率和无功功率进行同时控制的能力, 以及可实现对交流无源网络供电等众多优点<sup>[4,5]</sup>。

如图 1 所示为两端联结电网的柔性直流输电系统主要设备及系统构成示意图, VSC 换流站的主要设备有全控换流器、直流电容器、换相电抗器、交流滤波器以及换流变压器等。

由文献[6]可知, 组成柔性输电系统的两个 VSC 换流器拓扑结构相同, 同时都可通过对控制角  $\delta$  与  $U_c$  两个参数的控制来实现对柔性直流输电系统的有功功率和无功功率的独立控制, 使两个 VSC 分别作为功率的发送端和接收端来完成能量的四象限传输。因此建立柔性直流输电系统的数学模型也就是对 VSC 换流器进行数学建模。

柔性直流输电系统两端均采用电压源型换流器(VSC)来进行换流, 则整流侧和逆变侧的 VSC 具有相同的物理结构, 其中 VSC 主电路拓扑图如图 2 所示, 图中  $U_{sa}$ 、 $U_{sb}$ 、 $U_{sc}$  为三相对称电网电压;  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为三相电网相电流;  $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$  为换流器开关管的开关信号,  $S_j (j = a, b, c) = 1$  (上桥臂开关管导通, 下桥臂开关管关断),  $S_j = 0$  (下桥臂开关管导通, 上桥臂开关管关断);  $U_{dc}$  为直流电压;  $R$ 、 $L$  为滤波电抗器的电阻和电感;  $C$  为直流侧电容;  $U_{ca}$ 、 $U_{cb}$ 、 $U_{cc}$  为换流器的输入电压。由参考文献[7]可知 VSC 在 dq0 同步旋转坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} L_s \frac{di_d}{dt} = U_{sd} - U_{cd} - R_s i_d + \omega L_s i_q \\ L_s \frac{di_q}{dt} = U_{sq} - U_{cq} - R_s i_q - \omega L_s i_d \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\omega$  为系统角频率,  $R_s$ ,  $L_s$  为交流侧电感参数,  $U_{sd}$ ,  $U_{sq}$ ,  $U_{cd}$ ,  $U_{cq}$ ,  $i_d$ ,  $i_q$  分别为 dq0 旋

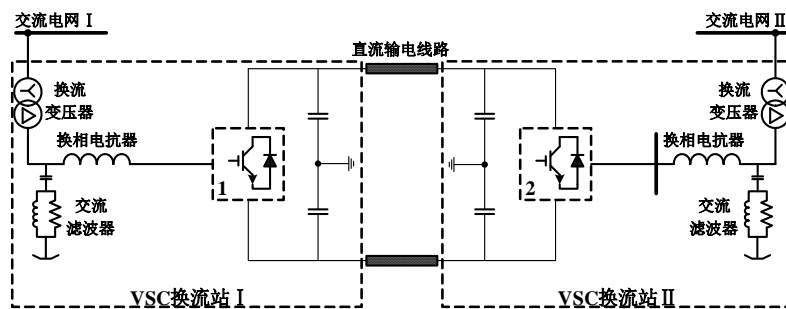


Figure 1. Block diagram of both ends of the links HVDC flexible grid system  
图 1. 两端联结电网的柔性直流输电系统结构图

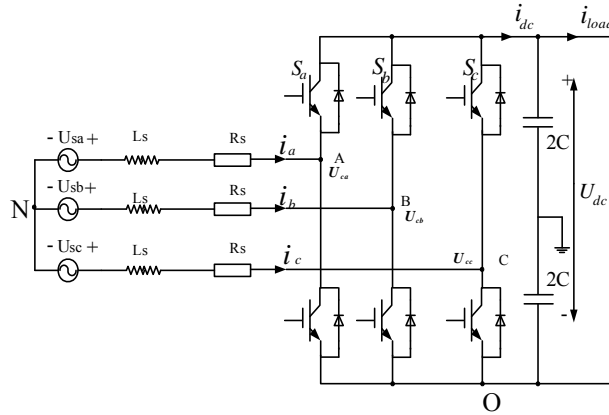


Figure 2. VSC inverter schematic  
图 2. VSC 换流器原理图

转坐标系下的交流电源电压  $d$  轴和  $q$  轴分量, VSC 侧控制电压  $d$  轴和  $q$  轴分量, 输入交流电流  $d$  轴和  $q$  轴分量。

此外, 根据瞬时功率理论<sup>[8]</sup>, 在忽略换流电抗器电阻和换流器开关损耗的稳态情况下, 换流器交流侧的有功功率与无功功率和直流侧的有功功率可分别表示为:

$$\begin{cases} P_{ac} = \frac{3}{2}(U_{sd}i_d + U_{sq}i_q) \\ Q_{ac} = \frac{3}{2}(U_{sq}i_d - U_{sd}i_q) \end{cases} \quad (2)$$

在三相电网电压平衡条件下, 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  $U_s$  ( $U_s$  为电网电压空间矢量的幅值), 则有:

$$\begin{cases} U_{sd} = U_s \\ U_{sq} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)中可得:

$$\begin{cases} P_{ac} = \frac{3}{2}U_s i_d \\ Q_{ac} = -\frac{3}{2}U_s i_q \end{cases} \quad (4)$$

在无穷大系统中,  $U_s$  基本上维持恒定。显然, 由式(4)可知, 可以通过有功电流  $i_d$  和无功电流  $i_q$  分别控制有功功率和无功功率, 从而实现有功功率和无功功率的独立控制。

### 3. VSC-HVDC 系统的控制方法

VSC-HVDC 系统控制方法主要有间接电流控制

与直接电流控制两种。间接电流控制通过控制 VSC 交流侧基波电压的幅值与相位以控制交流电流。这种控制方法结构简单、易于实现, 但存在有功功率与无功功率解耦困难、动态响应慢的缺点, 同时无法直接实现电流的保护和限流控制功能。与间接电流控制相比, 直接电流控制采用了电流闭环控制方式, 具有快速的电流响应特性、易于实现限流控制、有功分量与无功分量易于实现解耦控制的优点, 因而本文采用了直接电流控制方法<sup>[9,10]</sup>。

直接电流控制采用了电流内环与功率外环的控制方式, 因此也被称为双闭环控制法。VSC-HVDC 双闭环控制框图如图 3 所示。外环用于控制交流系统有功功率、无功功率、交流侧电压以及直流侧电压。内环用于保证 VSC 的输出交流电流能够跟踪外环控制输出电流指令, 输出 VSC 电压参考波, 由 PWM 实现开关控制。

柔性直流输电系统必须具备以下两大类控制模式<sup>[11,12]</sup>:

1) 有功功率相关控制器。主要功能是通过 VSC 换流站直接控制注入到交流系统的有功功率或者间接调节与有功功率相关的物理量, 主要有: a) 有功功率控制, b) 直流电压控制, c) 频率控制等;

2) 无功功率相关控制器。主要功能是通过 VSC 换流站直接控制注入到交流系统的无功功率或者间接调节与无功功率相关的物理量, 主要有: a) 无功功率控制, b) 交流电压控制。

柔性直流输电系统正常稳态运行时, 每个 VSC 可以各自独立地控制其交流侧无功功率或交流母线

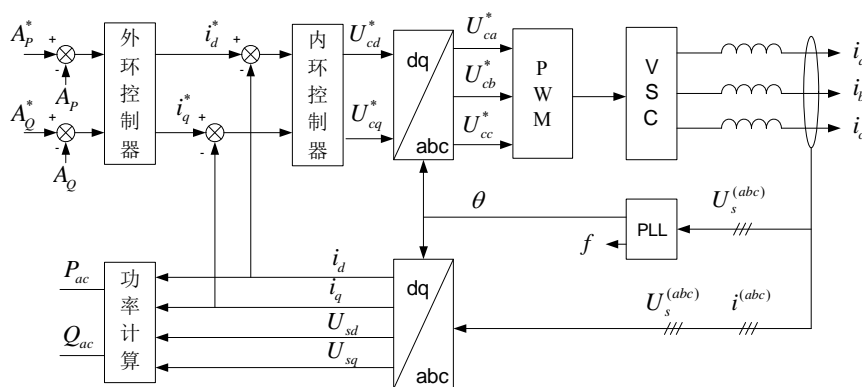


Figure 3. Schematic of flexible the DC transmission control method  
图 3. 柔性直流输电控制方法框图

电压，但直流网络的有功功率必须保持平衡，即输入直流网络的有功功率必须等于直流网络输出的有功功率加上换流器和直流网络的有功功率损耗。如果出现任何差值，都将会引起直流电压的升高或降低。为了实现有功功率的自动平衡，在 VSC-HVDC 系统中必须选择一端 VSC 控制其直流侧电压，充当整个直流网络的有功功率平衡换流器，其它 VSC 则可在其自身容量允许的范围内任意设定有功功率。控制模式组合如图 4 所示。

#### 4. 仿真分析

根据上面的分析可知，柔性直流输电系统的控制方法已经给出，在这里为了验证上述的控制方法，运用 Matlab/Simulink 仿真软件对其进行仿真实验。仿真参数见表 1。

##### 4.1. 稳态仿真结果

图 5 与图 6 是系统在额定功率条件下的稳态仿真结果图，此时系统是连接两个交流电网，在发送端换流站采用的控制方法是定直流电压和定无功功率的组合，接收端换流站采用的控制方法是定有功功率和定无功功率的组合。有功功率的参考值为 20 MW，无功功率参考值为零，即单位功率因素控制。

由图 5 与图 6 可知，系统的直流母线电压控制非常稳定，系统的稳定性能好，有功功率与无功功率的控制是独立的，从而证明了本文所设计的解耦控制是十分有效的。而相对于发送端的功率控制结果，接收端的功率控制效果略微差一些，只是对系统的稳定的影响是微乎其微的，除去输电线路损耗等因素，整体

上系统发送端与接收端的功率是几乎相等的。验证了本文所提出的柔性直流输电系统控制方法是有效的。

##### 4.2. 暂态仿真结果

对于暂态仿真做了两种情况下的仿真研究，分别是(1)有功功率在 2 s 时由 10 MW 阶跃至 20 MW，无功功率在 4 s 时由 0 MVA 阶跃至 10 MVA，仿真结果如图 7 和图 8 所示；(2)有功功率在 2 s 时由 10 MW 反转至-10 MW，无功功率在 4 s 时由-10 MVA 反转至 10 MVA，仿真结果如图 9 和图 10 所示。

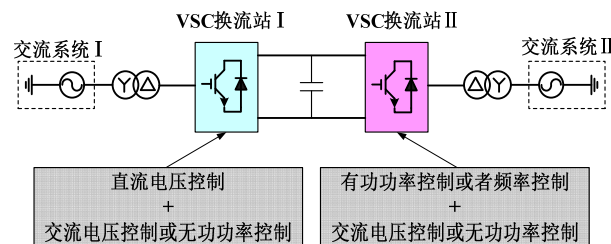


Figure 4. HVDC flexible control method block diagram  
图 4. 柔性直流输电控制方法框图

Table 1. Simulation parameter flexible DC transmission system  
表 1. 柔性直流输电系统仿真参数表

参数名称	参数数值
输电容量	20 MVA
交流电网电压( $U_s$ )	10.5 kV
直流母线电压( $U_{dc}$ )	20 kV
交流电网电压( $U_s$ )	520 V
换流电抗器( $L_s$ )	16 mH
换流电抗器内阻( $R_s$ )	0.0025 $\Omega$
直流母线电容(C)	7500 $\mu$ F
IGBT 开关频率	2000 Hz

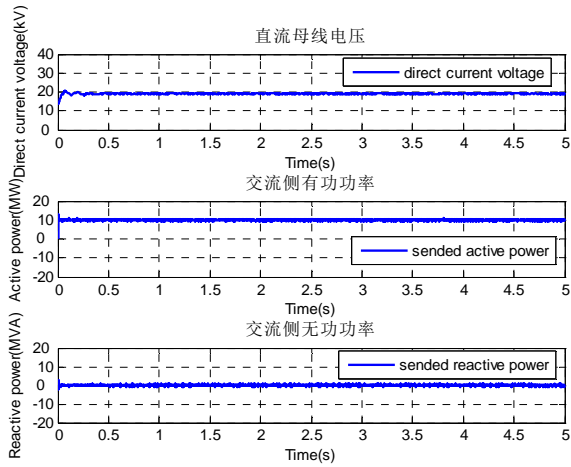


Figure 5. Converter station simulation results for steady-state transmission sender  
图 5. 稳态时输电发送端换流站仿真结果

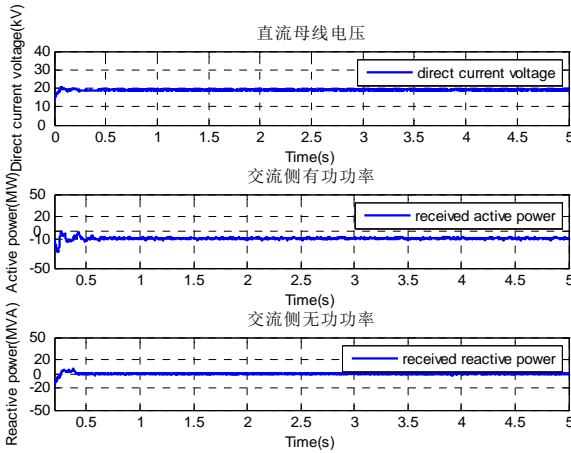


Figure 6. Converter station simulation results for steady-state transmission recipient  
图 6. 稳态时输电接收端换流站仿真结果

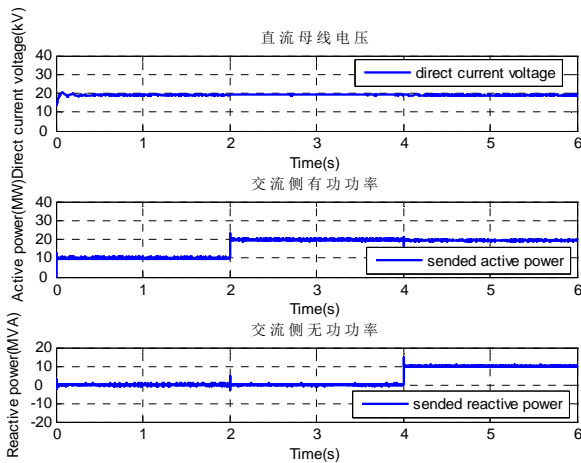


Figure 7. Converter station simulation results for transient-state transmission sender  
图 7. 暂态时输电发送端换流站仿真结果

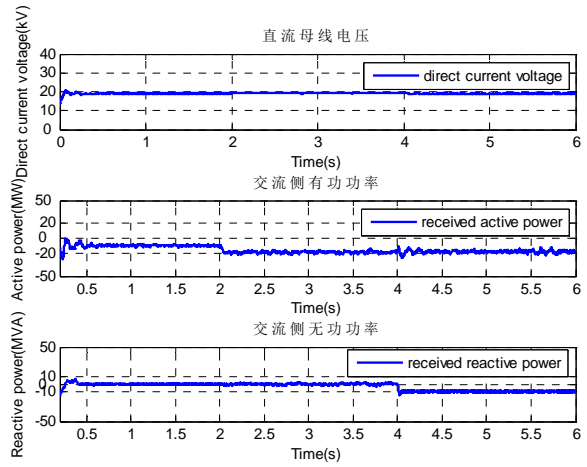


Figure 8. Converter station simulation results for transient-state transmission recipient  
图 8. 暂态时输电接收端换流站仿真结果

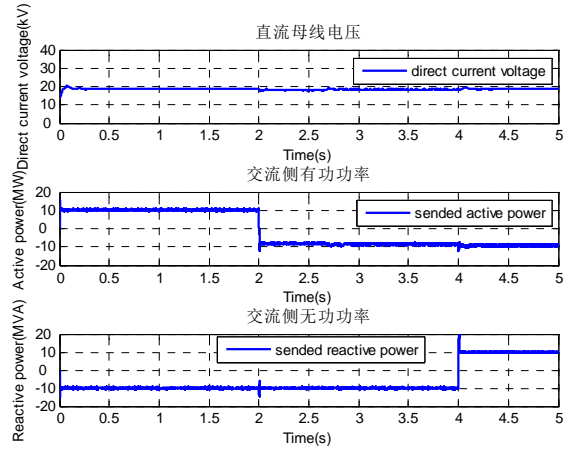


Figure 9. Converter station simulation results for transient-state transmission sender  
图 9. 暂态时输电发送端换流站仿真结果

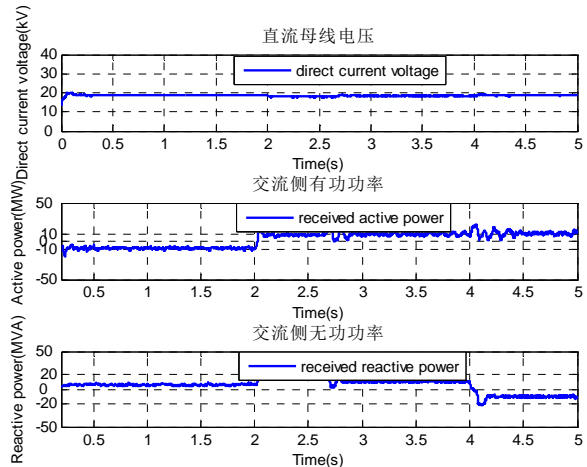


Figure 10. Converter station simulation results for transient-state transmission recipient  
图 10. 暂态时输电接收端换流站仿真结果

图7所示的是柔性直流输电系统发送端换流站的仿真结果图,当有功功率发生阶跃变化时,对直流母线电压产生的影响是非常小,仅仅是在阶跃的一瞬间有微小的影响。而有功功率的阶跃变化对无功功率的影响也是很小的,在阶跃的很短时间内无功功率有所冲击,但无功功率的响应时间非常快,调整效果非常明显。当无功功率发生阶跃变化时,对直流母线电压和有功功率的影响是非常小的,几乎可以忽略不计,从而也验证了本文所设计的控制方法的效果十分理想。

图8所示的柔性直流输电系统接收端换流站的仿真结果图,可以看出,不管是无功还是有功的阶跃变化对于直流母线电压的影响是非常小的,有功与无功功率之间的相互影响也是很小的,调节效果尽管不如发送端,但对于系统的稳定性能是没什么影响的,仿真结果基本上符合设计的要求。

图9所示的为柔性直流输电系统发送端的仿真结果图,当有功功率发生反转变时,直流母线电压的略微有所降低 0.5 kV,但迅速调整到额定电压,无功功率有细微的振荡,快速的响应时间让无功功率受到的影响降到了最低点。当无功功率反转变时,对直流母线电压的影响是近似为零的,对于有功功率的影响时间非常短,快速的响应时间也让有功功率摆脱了无功功率的影响,从而说明有功功率与无功功率的独立控制有功功率发生反转变时是十分成功。图10所示的为柔性直流输电系统接收端的仿真结果图,当有功和无功功率发生反转变时,对于直流母线电压影响是微乎其微的,有功与无功功率也成功实现了独立控制。

## 5. 结论

本文首先简要概述了柔性直流输电系统的结构

及其功能,其次建立了 d-q 旋转坐标系下精确的 VSC-HVDC 数学模型,提出了柔性直流输电系统的矢量控制方法,并针对柔性直流输电系统的特点,构建了不同的控制模式及其组合。仿真结果验证了,所提出的控制方法结构简单,具有良好的动静态性能,成功实现了有功功率和无功功率的独立控制,具有一定的理论指导价值。

## 参考文献 (References)

- [1] X. Wang, B. T. Ooi. High Voltage Direct Current transmission system based on Voltage Source Converters. PESC'90, San Antonio, 1990, 1: 325-332.
- [2] B. T. Ooi, X. Wang. Boost type PWM HVDC transmission system. IEEE Transaction on Power Delivery, 1991, 6(4): 1557-1563.
- [3] 国家电网公司科技部. 柔性(轻型)直流输电系统关键技术研究框架[Z]. 国家电网公司科技部, 2006.
- [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] 胡冬良, 赵成勇, 李广凯. 电压源换流器高压直流输电的进展[J]. 南方电网技术, 2008, 5: 19-23.
- [6] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高压技术, 2007, 1: 1-10.
- [7] 郑超, 周孝信, 李若梅等. VSC-HVDC 稳态特性与潮流算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 1-5.
- [8] N. Flourentzou, V. G. Agelidis and G. D. Demetriades. VSC-based HVDC power transmission systems: An overview. IEEE Transaction on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [9] C. Q. Du, A. Sannino and M. H. J. Bollen. Analysis of the control algorithms of voltage-source converter HVDC. Proceedings of IEEE-PES Power Tech, St. Petersburg, 27-30 June 2005: 1-7.
- [10] C. Q. Du, E. Agneholm and G. Olsson. Comparison of different frequency controllers for a Vsc-HVDC supplied system. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2224-2232.
- [11] H. F. Latorre, M. Ghandhari and L. Söder. Application of control Lyapunov functions to voltage source converters-based high voltage direct current for improving transient stability. Power Tech, Lausanne, 1-5 July 2007: 244-249.
- [12] A. Pizano-Matinez, C. R. Fuente-Esquivel, H. Ambriz-Pérez and E. Acha. Modeling of VSC-based HVDC systems for a Newton-Raphson OPF algorithm. IEEE Transaction on Power Systems, 2007, 22(4): 1794-1803.