

基于多重化换流器的柔性直流输电系统及其实验研究

邓 明, 敬华兵, 黄志国, 毕金融, 张 卓, 何伯钧

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 主要介绍了 VSC-HVDC 的工作原理及其换流站数学模型, 并提出了一种新型的基于多重化换流器的柔性直流输电系统拓扑, 详细分析了其结构特征与控制策略, 最后根据文章提出的换流器拓扑搭建了一套柔性直流输电实验系统。实验结果表明, 基于多重化换流器的柔性直流输电系统具有功率输送稳定、功率因数高、谐波含量低、可控性好等优异性能, 具有广泛的工程应用前景。

关键词: 柔性直流输电; 多重化换流器; 实验系统

中图分类号: TM72

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2013)01-0029-06

VSC-HVDC System Based on Multi-converters and Its Experimental Research

DENG Ming, JING Hua-bing, HUANG Zhi-guo, BI Jin-rong, ZHANG Zhuo, HE Bo-jun

(CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: It mainly introduced the working principle and converter mathematical model of VSC-HVDC, put forward a novel VSC-HVDC system based on multi-converters, and then analyzed its structure characteristics and control strategies in detail, finally built a set of VSC-HVDC experimental system according to the proposed multi-converters topology. The experimental results show that the VSC-HVDC system based on multi-converters has excellent performance such as stable power transfer, high power factor, low harmonic content, good controllability, etc., and has an extensive engineering application prospect.

Key words: voltage source converter-high voltage direct current(VSC-HVDC); multi-converters; experimental system

0 引言

自从20世纪五十年代高压直流输电(HVDC)工程在瑞士投入商业运行以来,传统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连结等场合得到了广泛地应用。但随着直流输电技术的不断发展,以及市场需求的扩大,传统HVDC由于其核心——换流器采用半控型晶闸管,存在着无法向无源系统输送功率和换流时需要消耗大量的无功功率等主要缺陷,因而约束了其应用前景。

随着现代电力电子技术的飞速发展,特别是具有

可关断能力的电力电子器件容量的不断提升以及性能的不断改进,如绝缘栅双极晶体管(IGBT)、门极关断晶闸管(GTO)等促进了直流输电技术的一次重大变革。新一代的柔性直流输电技术(VSC-HVDC)^[1-2]是以全控型可关断器件构成的电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)和脉宽调制(PWM)控制技术为基础的。换流器中全控型器件代替半控型晶闸管,使得柔性直流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络供电等众多优点。VSC-HVDC输电技术克服了传统直流输电技术的不足,并扩展了直流输电的应用领域。

为了充分发挥柔性直流输电的优异性能,换流器的主电路拓扑结构设计是一个重要方面,它与实际工程的容量和电压等级、IGBT串联数目、开关频率、损耗、

收稿日期: 2012-12-17

作者简介: 邓明(1984-),男,硕士研究生,工程师,主要从事大功率变流器与智能电网系统技术研发工作。

开关调制方式和系统可控性等因素密切相关。目前对换流器拓扑的研究主要集中于两个方向：一个是桥臂器件直接串联的两电平或者三电平VSC拓扑结构，通过桥臂器件的串联方式能够很直接地提高电压等级，从而提高输电的容量，加之其拓扑结构简单，采用常规的PWM调制方式即可实现对换流器的功率控制，但是桥臂器件的直接串联带来的均压问题、两电平或者三电平VSC的谐波含量高等都是该换流器拓扑结构不可忽略的缺点^[3-4]；另一个是模块化多电平VSC拓扑结构，将IGBT和直流电容结合起来，采用分散方式，做成低压功率模块，然后通过许多低压功率模块的级联方式实现高等级电压，不仅可以有效地降低每个功率模块中开关器件的电压应力，还可以实现高质量的输出波形，但是分散在各个功率模块中的直流电容电压的平衡控制问题以及相间环流问题等一直是阻碍其大规模工程应用的技术瓶颈^[5-6]。

本文针对现有柔性直流输电的换流站拓扑结构的不足，提出了一种新型基于多重化换流器的拓扑。该换流器由多绕组移相变压器与6个VSC功率模块组成，通过互相隔离的变压器二次侧低压绕组分别与功率模块交流侧对应连接，功率模块的直流输出侧采用串联方式形成高压直流输电拓扑结构。多重化换流器优点比较明显：一方面可以通过功率模块级联模式明显降低开关器件的电压应力与开关损耗；另一方面由于对功率模块采用比较成熟的PWM控制可以大大减小柔性直流输电系统的控制难度。

1 VSC-HVDC 工作原理及其数学模型

1.1 系统结构

典型的柔性直流输电(VSC-HVDC)系统的原理结构图如图1所示，其核心器件主要由两个电压源型换流器(VSC)组成。直流侧电容器的作用是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；换流电抗器是VSC与交流侧能量交换的纽带，同时也起到滤波的作用；交流滤波器的作用是滤去交流侧谐波；变压器将电网的交流电压降低到适合换流器工作的大小。

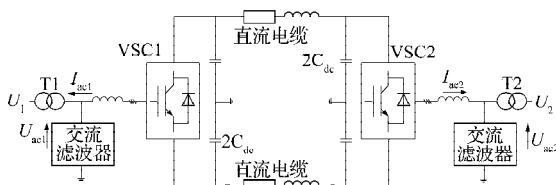


图1 VSC-HVDC原理图

Fig.1 Schematic diagram of VSC-HVDC

电压源型换流器(VSC)主电路拓扑图如图2所示，图中 $U_s(j=a,b,c)$ 为三相对称电网电压； $i_j(j=a,b,c)$ 为三相电网相电流； $S_j(j=a,b,c)$ 为换流器开关管的开关信号， $S_j=1$ (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； i_{dc} 、 i_L 分别为直流电流与直流输出负载电流； R 、 L 为换流电抗器的电阻和电感； C 为直流侧电容； $U_c(j=a,b,c)$ 为换流器的交流侧电压。

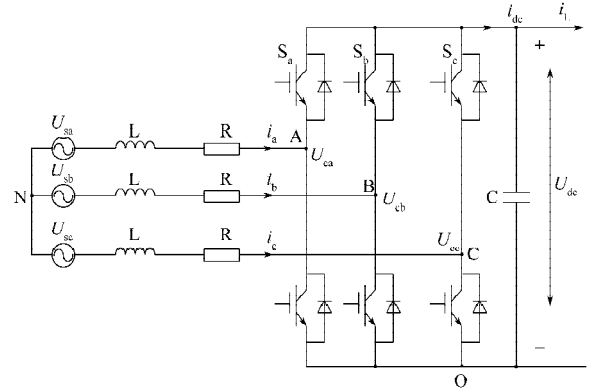


图2 VSC 电路拓扑图

Fig.2 Topology of VSC

1.2 基本工作原理

设首端交流母线电压基波分量为 U_s ，换流器输出电压基波分量为 U_c ， U_c 滞后于 U_s 的角度为 δ ，换流电抗器电抗为 X 。假设换流电抗器是无损耗的，忽略谐波分量时，换流器与交流电网之间传输的有功功率 P 和无功功率 Q 分别为：

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

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

由式(1)可以看出，有功功率的传输主要取决于 δ ，当 $\delta > 0$ 时，VSC吸收有功功率，相当于在传统HVDC中做整流器运行；当 $\delta < 0$ 时，VSC发出有功功率，相当于在传统HVDC中做逆变器运行。因此，通过对 δ 角的控制，就可以控制直流电流的方向及输送功率的大小。

由式(2)可见，无功功率的传输主要取决于 $U_s - U_c \cos \delta$ ，当 $U_s - U_c \cos \delta > 0$ 时，VSC吸收无功功率；而当 $U_s - U_c \cos \delta < 0$ 时，VSC发出无功功率。而 U_c 是由换流器输出的PWM电压脉冲宽度控制的，所以，通过控制 U_c 的大小就可以控制VSC发出或吸收的无功功率的大小。

1.3 同步旋转坐标系下换流器的数学模型

设三相电网电压平衡，根据图2的VSC拓扑结构，可得到同步旋转坐标系下VSC的数学模型：

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di_d}{dt} &= U_{sd} - U_{cd} - Ri_d + \omega Li_q \\ L \frac{di_q}{dt} &= U_{sq} - U_{cq} - Ri_q - \omega Li_d \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: U_{sd} 、 U_{sq} ——电网电压的 d 、 q 轴分量; U_{cd} 、 U_{cq} ——VSC交流侧电压的 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q ——电网电流的 d 、 q 轴分量, ω ——电网角频率。

此外, 根据瞬时功率理论^[7-8], 在忽略换流电抗器的电阻与换流器开关损耗的稳态情况下, 换流器交流侧的有功功率和无功功率与直流侧的有功功率可以分别表示为式(4)、式(5):

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{3}{2}(U_{sd}i_d + U_{sq}i_q) \\ Q &= \frac{3}{2}(U_{sq}i_d - U_{sd}i_q) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$P_{dc} = U_{dc}i_{dc} \quad (5)$$

由能量守恒定律可知, 交流侧与直流侧的有功功率平衡, 即有:

$$i_{dc} = \frac{3(U_{sd}i_d + U_{sq}i_q)}{2U_{dc}} \quad (6)$$

在直流侧由基尔霍夫电流定律可得:

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3(U_{sd}i_d + U_{sq}i_q)}{2U_{dc}} - i_L \quad (7)$$

由式(3)和式(7)就构成了同步旋转坐标系下换流器的数学模型。

式(6)表明, VSC在直流侧可以等效成一个受控的电流源。所以在同步旋转坐标系下, 可得VSC的等效电路, 如图3所示。

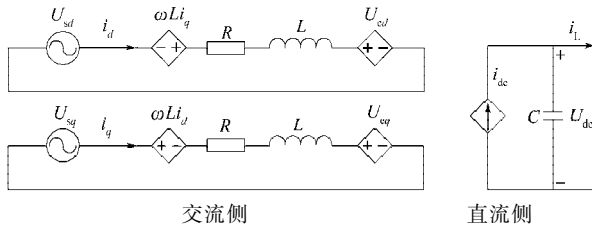


图3 VSC 等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of VSC

2 多重化换流器拓扑结构与技术特点

多重化换流器的拓扑结构图如图4所示。

如图4所示, 换流器主要由多绕组移相变压器与6个VSC功率模块组成, 其中移相变压器二次侧为六绕组结构, 每个绕组之间互相隔离; VSC功率模块 $U_1 \sim U_6$ 的输入侧分别与移相变压器的二次侧低压绕组连接, 输

出直流侧串联形成高压直流输电, 由此组成六重化的柔性直流输电高压换流器。

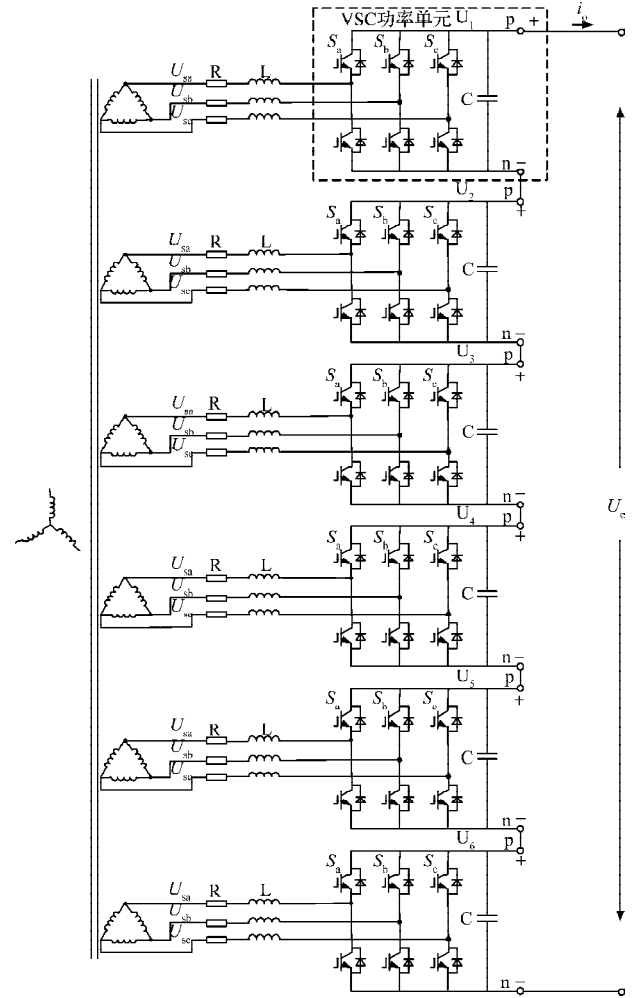


图4 多重化换流器拓扑图

Fig.4 Topology of multi-converters

采用多重化换流器有如下几种技术特点:

(1) 通过移相变压器的一、二次侧绕组分别连接可以实现高低压系统的相互隔离, 由于变压器二次侧绕组移相, 系统产生的谐波含量低;

(2) 采用模块化级联方式, 通过移相控制, 每个功率模块的开关频率低, 换流器开关损耗小, 相应减小开关器件的电压应力;

(3) 每个功率模块结构相同, 因电压等级降低而易于工程应用, 可靠性高, 组合方式灵活。

3 VSC-HVDC 控制策略

本文所提出的VSC-HVDC控制系统是由电流内环和功率外环双闭环控制器组成, 其控制策略原理框图如图5所示。整流端和逆变端两侧的控制原理相同, 根据不同的控制要求而相应选择匹配的控制策略。

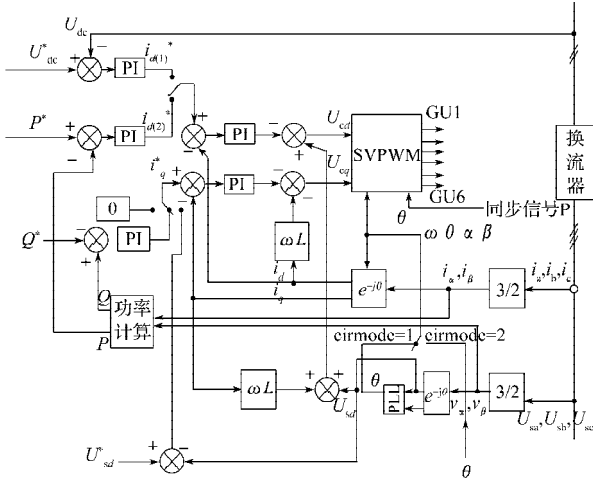


图5 VSC-HVDC控制策略原理框图

Fig.5 Schematic diagram of VSC-HVDC control strategy

VSC-HVDC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。

3.1 电流内环控制器

从式(3)可以看出, \$d\$轴和 \$q\$轴的电流分量存在互相耦合,因此在动态的调节过程中, \$d\$轴和 \$q\$轴分量会互相作用,对控制带来不利影响。为提高其动态调节特性可采用前馈补偿解耦控制,实现 \$d\$轴和 \$q\$轴电流分量的独立解耦控制。当VSC的电流调节器采用PI型调节器,并将VSC的输出电压的 \$d\$轴和 \$q\$轴分量分别取为:

$$\begin{cases} U_{cd} = -(K_p + \frac{K_I}{s})(i_d^* - i_d) + U_{sd} + \omega L i_q \\ U_{cq} = -(K_p + \frac{K_I}{s})(i_q^* - i_q) + U_{sq} - \omega L i_d \end{cases} \quad (8)$$

式中: \$K_p, K_I\$——分别为电流PI调节器的比例系数和积分系数。

忽略换流器损耗,将式(8)代入式(3)可得:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -(K_p + \frac{K_I}{s}) \times i_d + (K_p + \frac{K_I}{s}) \times i_d^* \\ L \frac{di_q}{dt} = -(K_p + \frac{K_I}{s}) \times i_q + (K_p + \frac{K_I}{s}) \times i_q^* \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)、式(9)可以看出, \$d\$轴和 \$q\$轴电流分量实现了前馈解耦,分别为有功和无功电流的参考值,通过

外环控制器输入相应给定值,电流内环结构原理图如图6所示。

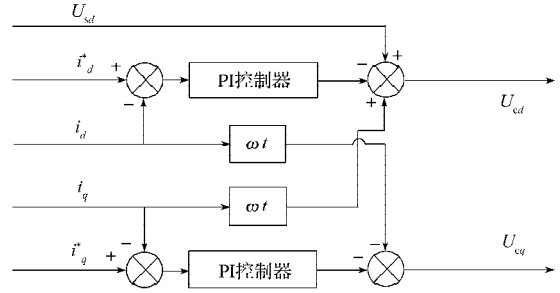


图6 电流内环原理框图

Fig.6 Schematic diagram of current inner-loop controller

3.2 功率外环控制器

根据瞬时功率理论,在同步旋转坐标系下,忽略换流器和变压器的损耗,选取 \$d\$轴与电网电压 \$a\$相重合,即 \$U_{sd} = |U_{sa}|, U_{sq} = 0\$,由式(4)可知,在有功和无功电流的参考值条件下,有功功率和无功功率的表达式分别为:

$$P = \frac{3}{2} U_{sd} \times i_d^* \quad (10)$$

$$Q = -\frac{3}{2} U_{sd} \times i_q^* \quad (11)$$

由式(10)、式(11)可分别推导得有功功率控制与无功功率控制器,为了消除稳态误差,引入PI调节器。有功功率外环控制器如式(12)所示,包括定有功功率控制与定直流电压控制两种方式。

$$\left. \begin{cases} i_d^* = \frac{2}{3} \frac{P^*}{U_{sd}} + (K_{pp} + \frac{K_{pi}}{s})(P^* - P) \\ i_d^* = (K_{pu} + \frac{K_{iu}}{s})(U_{dc}^* - U_{dc}) + \frac{2}{3} \frac{U_{dc}}{U_{sd}} \times i_L \end{cases} \right\} \quad (12)$$

式中: \$K_{pp}, K_{pi}\$——分别表示有功功率PI调节器的比例和积分系数; \$K_{pu}, K_{iu}\$——分别表示直流电压PI调节器的比例和积分系数。

同理可得无功功率外环控制器,包括定无功功率控制与定交流电压控制两种方式。

$$\left. \begin{cases} i_q^* = -\frac{2}{3} \frac{Q^*}{U_{sd}} + (K_{pq} + \frac{K_{iq}}{s})(Q^* - Q) \\ i_q^* = (K_{pu_s} + \frac{K_{iu_s}}{s})(U_{sd}^* - U_{sd}) \end{cases} \right\} \quad (13)$$

式中: \$K_{pq}, K_{iq}\$——分别表示无功功率PI调节器的比例和积分系数; \$K_{pu_s}, K_{iu_s}\$——分别表示交流电压PI调节器的比例和积分系数。

综上所述,柔性直流输电系统常用的功率外环控制方式可归纳为如表1所示。

表1 柔性直流输电功率外环控制表

Tab.1 Power outer-loop controller of VSC-HVDC

控制策略	控制手段	控制目标	适用范围
有功功率控制	定直流电压控制	换流器直流侧电压	发送端
有功功率控制	定有功功率控制	换流器有功功率	接收端
无功功率控制	定无功功率控制	换流器无功功率	发送端、接收端
无功功率控制	定交流电压控制	换流器交流侧电压	发送端、接收端

4 实验研究

4.1 实验系统参数

为了验证本文所提出的基于多重化换流器的柔性直流输电系统的功能,搭建了柔性直流输电实验系统。分别将2个拓扑结构完全相同的多重化换流器的移相变压器一次侧接入三相35 kV电网,作为柔性直流输电的整流端与逆变端2个换流器,同时将2个换流器的直流级联输出侧采用背靠背连接方式进行电缆连接(如图1所示的系统图),从而组成了柔性直流输电实验系统。

其中,整流端多重化换流器采用的是6个功率模块级联的方式,移相变压器的一次侧接入三相35 kV电网,二次侧6个独立绕组分别与6个功率模块一一对应连接。每个功率模块的交流侧输入电压为520 V,直流电压通过PWM整流至900 V,6个功率模块的直流电压叠加成额定5 kV输出,直流电流最大可至1 kA。与此同时,逆变端多重化换流器将整流端输送过来的最大5 MW的直流功率回馈至三相35 kV电网。柔性直流输电实验系统主要参数见表2所示。

表2 多重化换流器主要参数

Tab.2 Main parameters of multi-converters

输电容量 /MW	5
输入电压 /kV	35
输入电流 /A	83
直流电压 /kV	5
直流电流 /kA	1

功率外环控制策略:整流端采用定直流电压控制与定无功功率控制,逆变端采用定有功功率与定无功功率控制,无功功率参考值均设定为零。

4.2 实验结果

柔性直流输电试验过程中,传输有功功率按照500 kW步进,从0到5.5 MW,运行时系统电压稳定,功率传输平衡。

如图7所示,柔性直流输电系统直流电压十分稳定,显示测量值为5 250 V,波动在 $\pm 1\%$ 以内。

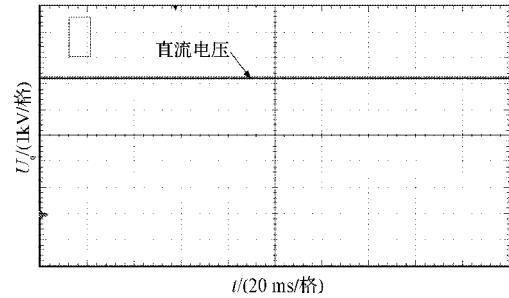


图7 直流电压波形图

Fig.7 Waveforms of DC voltage

柔性直流输电整流端与逆变端单个功率模块交流侧电压、电流波形分别如图8、图9所示。从图8中可以看出,整流端功率单元的交流电压与交流电流测量值准确地实现了有功功率的发送(注:电压测量值为线电压,电流测量值为线电流,两者之间相角差 30° ,电流滞后)。从图9中可以看出,逆变端功率单元的交流电压与交流电流测量值准确地实现了有功功率接收(注:电压测量值为线电压,电流测量值为线电流,两者之间相角差 150° ,电流超前)。从两图还可以看出,整流端与逆变端功率模块交流侧电压基本一致,而两端功率模块交流电流相位角正好互差 180° (单位功率因数PWM控制,其中整流端功率因数为1,逆变端功率因数为-1),从而实现了从整流端向逆变端的有功功率输送。

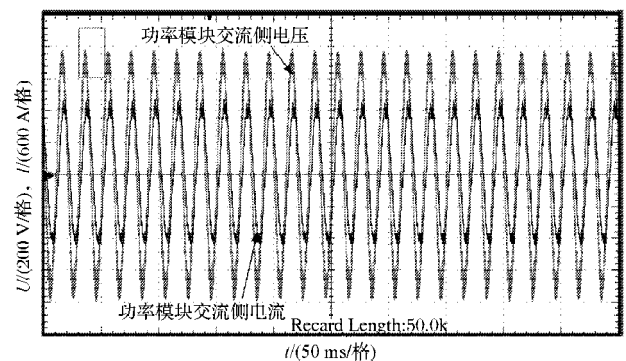


图8 整流端功率模块交流侧电压、电流波形图

Fig.8 AC voltage and current of rectifier-side power unit

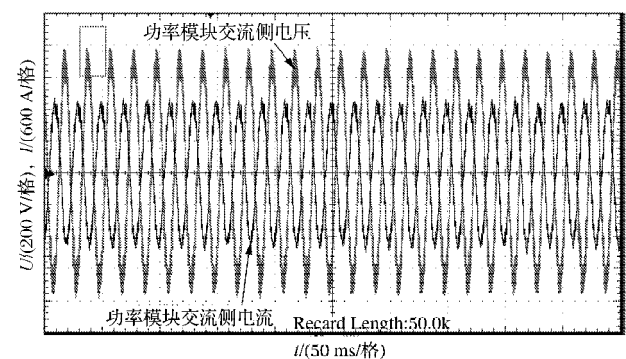


图9 逆变端功率模块交流侧电压、电流波形图

Fig.9 AC voltage and current of inverter-side power unit

图10~图12验证了本文所设计的柔性直流输电系统

的主要功能,其中整流端与逆变端换流器功率因数如图10所示。从图中可以看出,不管是整流端还是逆变端,其35 kV电网接入侧的功率因数由于采用PWM单位功率因数控制模式而很高,最高可达99.9%,具有良好的效果。

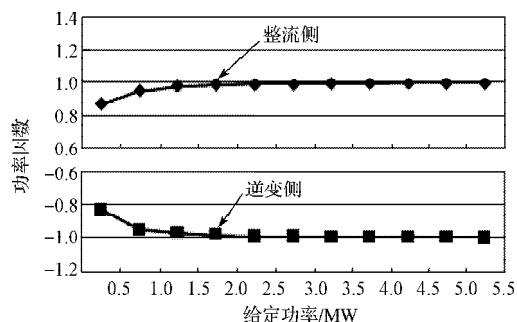


图10 整流端与逆变端换流器功率因数对比图

Fig.10 Power factor comparison of rectifier-side converter and inverter-side converter

整流端与逆变端换流器有功功率对比图如图11所示,网侧电压畸变率与输电效率如图12所示。从图中可以看出,系统输电效率约为93%,电压谐波含量低,符合国家相关标准规定值,可稳定可控地对能量进行传输,柔性直流输电功能得到了充分验证。

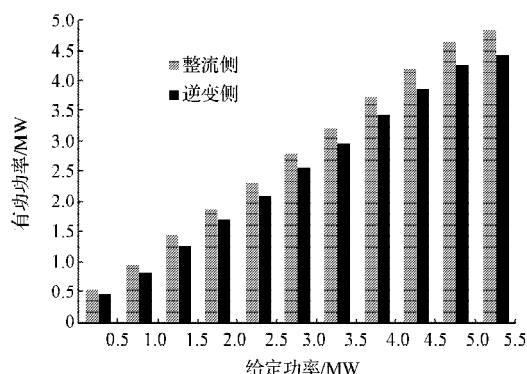


图11 整流端与逆变端换流器有功功率对比图

Fig.11 Power comparison of rectifier-side converter and inverter-side converter

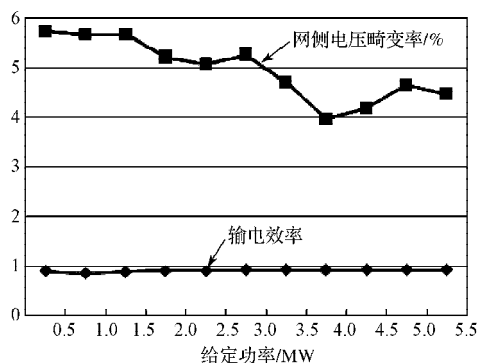


图12 网侧电压畸变率与输电效率图

Fig.12 Grid voltage THD and power transmission efficiency

5 结语

本文介绍了柔性直流输电的工作原理,并深入推

导了其数学模型,针对现有柔性直流输电的换流站拓扑结构的不足,提出了一种新型的基于多重化换流器拓扑,对其结构特征和技术特点作了详细的分析。最后对本文所提出新型拓扑结构搭建了柔性直流输电实验系统,进行了试验验证,实验结果表明本文所提出的基于多重化换流器的柔性直流输电系统具有功率输送稳定、功率因数高、谐波含量低、可控性好等优异性能,具有广泛的工程应用前景。

参考文献:

- [1] Ooi B T, Wang X. Boost type PWM HVDC transmission system [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1991, 6(4): 1557-1563.
- [2] 汤广福,贺之渊,滕乐天,等. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 39-44.
- [3] 徐政,陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007(1): 1-10.
- [4] 张桂斌. 新型直流输电及其相关技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [5] 丁冠军,汤广福,丁明,等. 新型多电平电压源换流器模块的拓扑机制与调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 1-8.
- [6] 刘钟淇,宋强,刘文华. 基于模块化多电平换流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53-58.
- [7] Akira Nabae, Toshihiko Tanaka. A New Definition of Instantaneous Active-Reactive Current and Power Based on Instantaneous Space Vectors on Polar Coordinates in Three-Phase Circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1238-1243.
- [8] Shengli Huang, Li Kong, Tongzhen Wei, et al. Comparative analysis of PI decoupling control strategies with or without feed-forward in SRF for three-phase power supply[C]// International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008(ICEMS 2008), 2008: 2372-2377.
- [9] 石新春,周国梁,王娟,等. VSC-HVDC大功率拓扑结构研究[J]. 高电压技术, 2008(8): 1622-1627.
- [10] Du Cuiqing, Agneholm E, Olsson G. VSC-HVDC System for Industrial Plants with Onsite Generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1359-1366.

(上接第11页)

- [2] Heinle G. The Structure of Optimized Pulse Patterns[C]// Proceedings of 5th European Power Electronic Conference (EPE). Brighton, 1993: 378-383.
- [3] Ying Jiang, Ekstrom A. Analysis of Harmonic Transfer Through Converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(2): 287-293.
- [4] 刘可安. 地铁车辆交流传动系统主电路振荡抑制研究[J]. 机车电传动, 2006(3): 48-53.
- [5] Depenbrock M. Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 1988, 3(4): 420-429.
- [6] Steimel A. Stator-Flux-Oriented High Performance Control in Traction[C]// Tutorial H4, 35th Annual Meeting IEEE IAS Industry Application Society, 2000: 14-35.

