

# 直流侧串联的多VSC-HVDC 并联运行系统 直流侧电压平衡控制方法

石新春, 周国梁, 付超

(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 河北 保定 071003)

**摘要:** 为提高 VSC-HVDC 系统传输容量, 可采用直流侧串联的多 VSC-HVDC 并联运行系统, 但需解决其直流侧电压平衡问题。笔者对其平衡控制方法进行分析, 对系统存在自身参数不一致、指令功率突变、交流外部故障情况进行仿真验证。为降低器件开关频率并提高波形质量, 采用了载波移相的控制方法。仿真结果证实了所提出的直流侧串联的多 VSC-HVDC 并联运行系统直流侧电压平衡控制以及载波移相方法用于该系统的有效性。

**关键词:** VSC-HVDC; 并联运行; 直流侧电压平衡; 载波移相

中图分类号: TM721

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)03-0200-03

## DC Voltages Balancing Technology of the Multi-VSC-HVDC Parallel Operating System with DC Side in Series

SHI Xin-chun, ZHOU Guo-liang, FU Chao

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

**Abstract:** Multi-VSC-HVDC parallel operating system with DC sides in series could be adopted to increase the transmission capacity of VSC-HVDC system, and the key problem is to balance the DC voltage. Therefore, DC voltage balancing technology of the parallel operating system was analyzed in this paper. Simulation was carried out to test its performance under some typical conditions such as self parameter disparity, power command step and AC side accident. To improve the waveform quality and decrease the switching frequency of each device, CPS-PWM was adopted for system control. The DC voltages balancing method and CPS-PWM control strategy were verified by the simulated results.

**Key words:** VSC-HVDC; parallel operating; DC voltages balance; CPS-PWM

### 0 引言

随着电力电子技术的迅猛发展尤其是功率半导体开关器件性能的不断改进, 电压源换流器高压直流输电(VSC-HVDC)凭借其独特的技术优点取得了飞速的进步, 并逐步呈现出取代传统高压直流输电的发展趋势<sup>[1,2]</sup>。近年来已在新能源发电系统联网<sup>[3]</sup>、不同交流系统的非同步连接<sup>[4]</sup>、向近海钻井平台等无源系统供电<sup>[5]</sup>、无功补偿等场合得到应用。目前建成投运的 VSC-HVDC 工程发展到了 $\pm 150$  kV、330 MW 的水平<sup>[1]</sup>, 为进一步提高其输送功率能力, 已提出的输电功率达到了 $\pm 300$  kV、1 000 MW 的水平<sup>[6]</sup>。但单纯依赖增加直接串联全控器件数量来提高功率水平增加了实际工程运行的难度, 并增加了系统损耗且降低了系统可靠性。

多电平拓扑<sup>[7,8]</sup>的引入可提高系统功率等级, 但过多的电平数必然带来附加设备增加、直流侧电压平衡控制困难的问题, 因此不利于 VSC-HVDC 系统的进一步大功率化。

对于背靠背应用(VSC-BTB), 可通过多系统直接并联的方式来提高系统的功率等级, 同时由于无直流线路, 因此可采用共用直流侧电容的方式<sup>[9]</sup>。2000年, 澳大利亚投运的 Direct Link VSC-BTB 工程受器件及其串联水平的限制采用了 3 条 VSC-HVDC 系统直接并联运行的方式, 但是对于该类两线输电式 VSC-HVDC 系统, 直流侧可通过串联以减少输电线路并提高其电压等级, 前提是必须解决直流侧电压平衡控制的问题。

笔者提出了一种直流侧串联的多 VSC-HVDC 并联运行系统直流侧电压平衡方法, 同时结合载波移相<sup>[10]</sup>调制方法, 针对系统自身参数不一致、指令功率突变和交流系统故障进行了仿真验证。

收稿日期: 2007-04-18; 修回日期: 2007-12-23

基金项目: 教育部博士点基金项目(20070079007)。

作者简介: 石新春(1950-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为直流输电与柔性交流输电、电能质量监测与治理等。

### 1 系统结构与控制

以两端均接有源网络的4条VSC-HVDC并联运行系统为例,见图1,直流侧电容串联以提高直流侧电压。

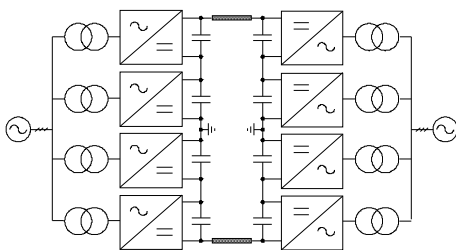


图1 多VSC-HVDC并联运行系统

定义左侧为送端站,以直流侧电压和无功控制为目标。送端站VSC模块相对独立运行,以各自直流侧电压为控制目标,因此直流侧电压无平衡问题。定义右侧为受端站,以功率控制为目标。由于受端站各模块之间工作状态有微小的差异,特别是在系统干扰条件下直流侧电压在不加附加控制的条件下无法平衡各电容电压,从而影响系统的安全稳定运行。因此笔者重点分析受端站直流电压平衡方法。受端站控制框图见图2。

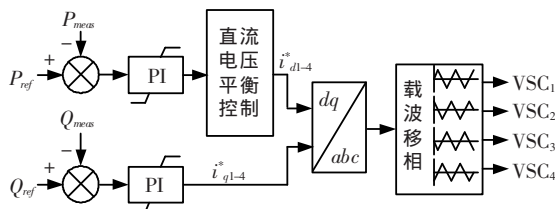


图2 受端站控制框图

有功功率经过PI控制器后得到有功电流分量,为平衡直流侧电压,引入直流电压平衡控制器。同时为了提高系统交流电流质量与降低直流侧电压脉动,采用了基于载波移相的控制方法。

直流侧电压变化与直流输入功率和VSC模块输出功率有关,因此基于有功电流分量调节的方法,可以解决直流侧电压平衡的问题,其控制框图见图3。正常以及一般故障情况下由于系统较为对称,因此有功调节量很小,不会引起某个单元过流。只有在换流器自身参数严重不一致情况下才会导致过流问题,而这种情况在实际系统中可作故障切除处理。

### 2 仿真

为验证笔者提出直流侧串联的多VSC-HVDC并联运行系统直流侧电压平衡控制方法的有效性,采用MATLAB/Simulink进行仿真试验<sup>[15]</sup>。仿真所采用的系统参数为:送端站变压器额定容量100MV·A,变比为110kV/4×12kV,等效损耗电阻0.001p.u.,变压

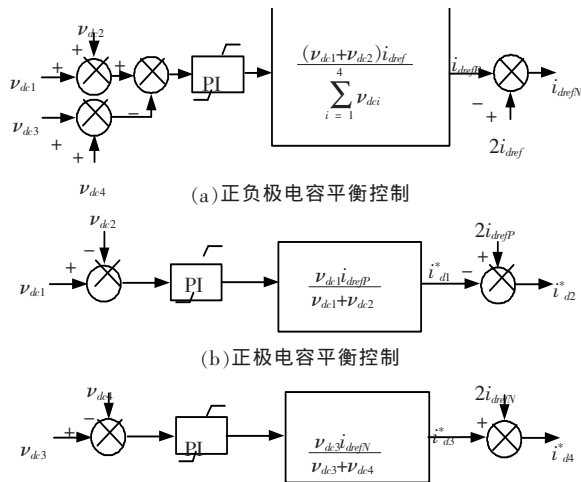


图3 受端站直流电压控制框图

器漏感与系统联接电感为0.2p.u.;受端站变压器额定容量100MV·A,变比为220kV/4×12kV,等效损耗电阻0.001p.u.,变压器漏感0.05p.u.,系统联接电感为0.1p.u.;器件开关频率600Hz;直流侧电容为500μF,其参考电压为25kV;直流输电线路等效电阻为0.6Ω,等效电感为8mH。

图4(a)为其中一个电容(400μF)与其他电容(500μF)不等时,且在1s时发生功率突变(P\_ref由0.4p.u.突变到0.8p.u.,Q\_ref由0突变到0.2p.u.)时直流侧电压波形。由图4(a)可知,系统对自身不对称有很强的抑制能力,且在功率指令发生突变时能迅速平衡各个串联电容电压,使得合成直流电压非常稳定。

图4(b)为受端站远方0.8s发生单相电阻性接地、1.2s时故障消除时直流侧电压波形。从图4(b)可以看出由于系统没有采用负序抑制算法,因此造成直流电压出现二次波动,但波动趋势一致,且在故障消除后能迅速平衡电容电压。

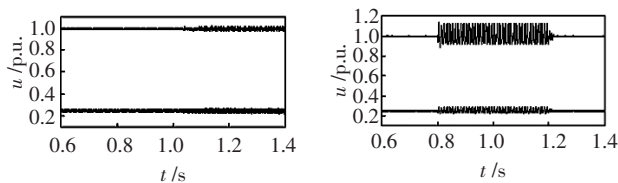


图4 受端站直流电压

图5为系统稳态交流电流和频谱分析以及直流电压波形。从图5可以看出由于采用了载波移相的控制方法,各个VSC-HVDC模块的交流电流和直流电压互相交错,使得系统在较低的开关频率下(600Hz)获得了较高的波形质量。

### 3 结语

笔者对直流侧串联的多VSC-HVDC并联运行

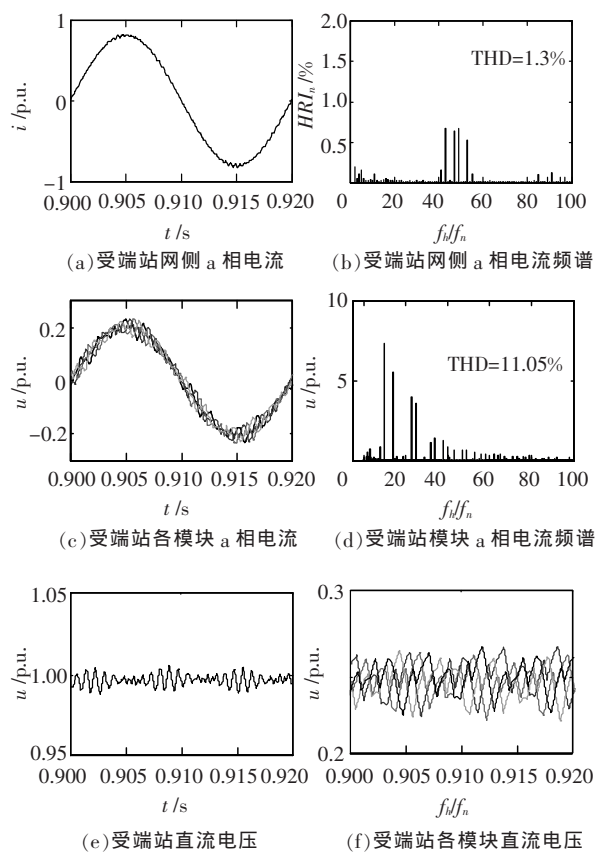


图5 受端站稳态波形

系统直流侧电压平衡方法进行分析,同时为了提高系统波形质量、降低开关频率采用了载波移相的控制方法,针对 VSC-HVDC 系统自身不平衡和外部交流故障进行了仿真验证,结果表明:

(1) 为提高系统功率等级,可采用直流侧串联的多 VSC-HVDC 并联运行系统。

(2) 基于有功分量调节的直流侧电压平衡控制可平衡各 VSC-HVDC 模块的直流电压。

(3) 载波移相(CPS-PWM)方法非常适合于多

VSC-HVDC 并联运行系统,可在同等波形质量基础上大大降低器件开关频率,从而降低系统开关损耗。

### 参考文献:

- [1] 文俊, 张一工, 韩民晓, 等. 轻型直流输电——一种新一代的 HVDC 技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-51.
- [2] 柔性(轻型)直流输电系统关键技术研究框架[M]. 北京: 国家电网公司科技部, 2006.
- [3] AXELSSON U, HOLM A, LIJEGREN C, et al. The Gotland HVDC Light Project Experiences from Trial and Commercial Operation[C]// CIGRE Conference Publication, 2001: 23-29.
- [4] PETERSSON A, EDRIS A. Dynamic Performance of the Eagle Pass Back-to-back HVDC Light Tie [C]// Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission, 2001: 220-225.
- [5] MATS H, LAMELL J O, TOM F N. New Application of Voltage Source Converter (VSC) HVDC to be Installed on the Gas Platform Troll A[C]// CIGRE Conference Publication, 2004: 397-402.
- [6] JACOBSON B, JIANG-HAFNER 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 Conference Publication, 2006: 1 973-1 979.
- [7] 刘洪涛, 徐政. 基于三电平电压源换流器的高压直流输电系统的控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18(3): 102-106.
- [8] ANDERSON B R, XU L, HORTON P J, et al. Topologies for VSC Transmission[J]. Power Engineering Journal, 2002(6): 142-150.
- [9] HAGIWARA M, FUJITA H, AKAGI, H. Performance of a Self-commutated BTB HVDC Link System under a Single-line-to-ground Fault Condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(1): 278-285.
- [10] BAKARI M. Multimodular Multilevel Converters with Input/Output Linearity[J]. IEEE Trans. Industry Applications, 1997, 33(5): 1 214-1 219.

(上接第 199 页)

(氮、氧数量级接近)下各类粒子数密度情况,发现由于氧的化学性质比较活泼,其对应粒子的数密度变化规律和氮在 5 000~20 000 K 有所不同。无论氮、氧元素比例如何,电子数密度基本不变,但随着氧的比重增加,电弧受氧的影响逐渐明显,导电能力逐渐增强。这些结论对混合气体电弧等离子体的研究是很好的补充,对密封型开关电器的研制和生产也有一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] 过增元. 电弧和热等离子体[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [2] HERMANN P K, WERNER F R. Influence of Physical/Chemical Characteristics of Organic Vapour and Gas Mixtures

on Their Contact Compatibility[J]. IEEE Trans. on Components and Packaging Technology, 1999, 22(3): 439-445.

- [3] BENJAMIN C, HASSAN R, ALAIN G. Calculation of the Interruption Capability of  $SF_6-CF_4$  and  $SF_6-C_2F_6$  Mixtures-part I: Plasma Properties [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1996, 24(1): 198-209.
- [4] VIAL L, CASANOVAS A M, DIAZ J, et al. Decomposition of High-pressure (400 kPa)  $SF_6$  and  $SF_6/N_2$  (10:90) Mixtures Submitted to Negative or 50 Hz AC Corona Discharges in the Presence of Water Vapour and/or Oxygen[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2001, 34(7): 2 037-2 051.
- [5] 臧春艳, 何俊佳, 程礼椿. 平衡态和非平衡态等离子体的微观模型研究[J]. 高压电器, 2005, 41(6): 416-419.