

# 基于 MMC 的多端柔性直流输电系统 改进下垂控制策略

阎发友<sup>1</sup>, 汤广福<sup>2</sup>, 贺之渊<sup>2</sup>, 孔明<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 2. 国网智能电网研究院, 北京市 昌平区 102200)

## An Improved Droop Control Strategy for MMC-based VSC-MTDC Systems

YAN Fayou<sup>1</sup>, TANG Guangfu<sup>2</sup>, HE Zhiyuan<sup>2</sup>, KONG Ming<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. State Grid Smart Grid Research Institute, Changping District, Beijing 102200, China)

**ABSTRACT:** The operation of voltage sourced converter based multi-terminal high voltage direct current (VSC-MTDC) system are required to meet the minimum  $N-1$  criterion, that is, when one converter is out of operation due to fault or maintenance, with the surviving converters a new power balance can be re-established and no voltage spikes, which are destructive to the power electronic switches, can be produced. In order to maintain the DC voltage and keep power balance, an improved DC voltage droop control strategy was proposed to control the DC voltage and schedule the DC power in the modular multilevel converter (MMC)-based VSC-MTDC system. A common DC voltage was introduced to participate in the DC voltage droop control. A MMC-HVDC simulation model including three stations was established on PSCAD/EMTDC. Simulations were done to validate the feasibility of the proposed improved droop control strategy under both the steady and transient states. The simulation results prove that the strategy can suppress the oscillation in the VSC-MTDC system caused by the AC side faults and the system could continue functioning even any one of the converters are tripped from the VSC-MTDC network.

**KEY WORDS:** voltage sourced converter based multi-terminal high voltage direct current (VSC-MTDC); modular multilevel converter; improved droop control;  $N-1$  criterion; common reference voltage

**摘要:** 多端柔性直流输电(voltage sourced converter based multi-terminal high voltage direct current, VSC-MTDC)系统安全运行至少应满足  $N-1$  法则, 即当一个换流站由于故障或检修退出运行时, 剩余系统可以恢复功率平衡而继续稳定运行, 且暂态过电压不会超过设备绝缘裕度。为了维持 VSC-MTDC 直流电压稳定及整个网络功率平衡的站间协调

控制, 提出一种改进直流电压下垂控制策略, 同时引入一个公共直流参考电压, 参与下垂控制换流站的功率调整。在 PSCAD/EMTDC 中建立基于模块化多电平换流器的三端 VSC-MTDC 仿真模型, 在稳态和暂态运行工况下对所提直流电压控制策略进行仿真实验。结果表明, 所提策略可抑制换流站交流侧故障引起的直流侧功率振荡, 进行换流站退出运行后系统功率的紧急输送, 提高了 VSC-MTDC 系统的运行稳定性。

**关键词:** 多端柔性直流输电; 模块化多电平换流器; 改进下垂控制;  $N-1$  法则; 公共参考电压

## 0 引言

我国电网正面临着大规模可再生能源并网、大容量远距离电能输送和输电走廊紧缺等问题。基于现代直流输电技术的多端直流输电将成为解决这些问题的有效技术手段之一<sup>[1-3]</sup>。多端直流输电系统是由 3 个及以上换流站, 通过串联、并联或混联方式连接起来的直流输电系统。电压源换流器(voltage sourced converter, VSC)功率反转时其直流侧电压的极性不变, 且没有换相失败等问题, 因此基于电压源换流器的多端柔性直流(voltage sourced converter based multi-terminal high voltage direct current, VSC-MTDC)技术在解决风电等大规模可再生能源并网、大型城市直流配电等领域具有较大技术优势<sup>[4-6]</sup>。作为新一代电压源换流器, 模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)采用模块化设计, 结构灵活且易于扩展, 可以有效地实现高电压、大功率能量转换, 因此在高压直流输电领域得到了越来越多的关注和应用<sup>[7-8]</sup>。因此, 本文针对基于 MMC 的多端柔性直流输电系统为对象进

基金项目: 国家自然科学基金项目(51177154)。

Project Supported by National Nature Science Foundation of China (51177154).

行研究分析。

多端柔性直流系统规划时其安全运行要求至少应满足  $N-1$  法则, 即当任一换流站由于故障或检修退出运行瞬间, 剩余换流站可以自动调整功率缺额, 保证站间功率交换平衡, 维持直流电压稳定, 同时过渡暂态过程中产生的过电压不会超过设备的绝缘裕度<sup>[9]</sup>; 另一方面, VSC-MTDC 系统稳定运行的重要前提是控制系统能够有效地控制系统的直流电压在系统允许的运行区间内<sup>[10-11]</sup>。若直流电压过高, 则系统中主设备的绝缘裕度会降低, 主设备可能损害; 反之若直流电压过低, 则直流电流增大, 系统损耗将增加。目前柔性直流输电系统直流电压控制方法有主从控制(master slave control)、直流电压裕度控制(voltage margin control)以及直流电压下垂控制(voltage droop control)等。主从控制是利用一个换流站作为松弛节点控制系统直流电压, 其它换流站采用定功率控制<sup>[11]</sup>。直流电压裕度控制基本原理是在直流电压控制换流站由于故障退出运行后, 后备直流电压控制站检测到直流电压偏差而自动切换为直流电压控制模式, 且无需站间通信<sup>[12]</sup>。直流电压下垂控制利用给定的各个换流站的直流功率(或电流)与直流电压的斜率关系来实现多个站共同承担直流电压控制<sup>[13-14]</sup>。文献[15]提出一种控制策略联合直流电压裕度控制和下垂控制实现 VSC-MTDC 系统的多点直流电压控制, 但裕度选择不当可能导致系统稳定工作时出现功率振荡。文献[16]比较了 VSC-MTDC 系统中几种直流电压控制方法的优缺点。

本文将首先通过计算 MMC 桥臂瞬时功率, 分析 MMC 三相桥臂瞬时功率之和与直流电压的关系; 然后在多端系统中引入一个公共直流参考电压, 并基于该公共直流参考电压提出了一种改进直流电压下垂控制策略, 实现 VSC-MTDC 系统的多点直流电压控制和站间功率协调控制。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中对所提出的控制策略进行仿真验证, 在系统稳态、换流站交流侧故障及换流站主动退运情况下分别验证了所提控制策略的有效性, 表明其可以满足 VSC-MTDC 系统的多点直流电压控制和功率协调控制。

## 1 MMC 等效电路和运行特性

### 1.1 MMC 数学模型

单相 MMC 等效电路如图 1 所示, MMC 中每

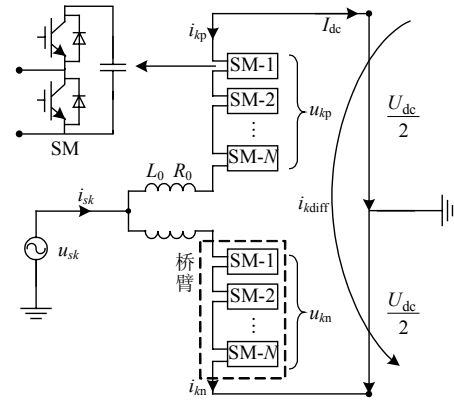


图 1 MMC 单相等效电路

Fig. 1 Single-phase equivalent circuit of MMC topology  
相由上、下两个桥臂组成, 每个桥臂由  $N$  个子模块(sub-module, SM)和桥臂电感串联构成。图 1 中,  $u_{sk}$  和  $i_{sk}$  为交流侧相电压和相电流( $k=a,b,c$ );  $L_0$ 、 $R_0$  分别为桥臂电感和等效电阻;  $i_{kp}$ 、 $i_{kn}$  分别为流过每相上、下桥臂的电流(下标  $p$  表示上桥臂,  $n$  表示下桥臂), 电流方向都定义为给子模块电容充电方向;  $U_{DC}$  和  $I_{DC}$  分别为直流侧电压和电流。

由图 1 可知  $k$  相上、下桥臂电流分别为

$$\begin{cases} i_{kp} = -\frac{i_{sk}}{2} + i_{kdiff} \\ i_{kn} = \frac{i_{sk}}{2} + i_{kdiff} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $i_{kdiff}$  为同时流过  $k$  相上、下桥臂的环流。

根据 MMC 的电路结构, 可得到 MMC 数学模型<sup>[17]</sup>为

$$u_{sk} = e_k + \frac{1}{2}(L_0 \frac{di_{sk}}{dt} + R_0 i_{sk}) \quad (2)$$

$$L_0 \frac{di_{kdiff}}{dt} + R_0 i_{kdiff} = \frac{U_{dc}}{2} - \frac{u_{kp} + u_{kn}}{2} \quad (3)$$

式中  $e_k = (u_{kn} - u_{kp})/2$  称为  $k$  相内电势。由式(2)可知, 通过控制内电势  $e_k$  可以对 MMC 交流侧  $k$  相电压和电流进行控制; 由式(3)可知, 通过控制桥臂环流  $i_k$  可以控制 MMC 直流侧电压。

### 1.2 MMC 桥臂瞬时功率与直流电压关系

MMC 的  $k$  相桥臂子模块的瞬时功率<sup>[18]</sup>为

$$p_k = u_{kp} i_{kp} + u_{kn} i_{kn} = p_{k\_cap} + p_{loss} \quad (4)$$

式中  $p_{k\_cap}$ 、 $p_{loss}$  分别为桥臂子模块电容储能瞬时变化量和桥臂开关器件的损耗功率。

MMC 中  $k$  相上、下桥臂投入子模块的等效电压和等效电流<sup>[18]</sup>可以表示为

$$\begin{cases} u_{kp} = n_p(t)u_{kp\_cap}^\Sigma(t) \\ u_{kn} = n_n(t)u_{kn\_cap}^\Sigma(t) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} i_{kp}(t) = \frac{C_{SM}}{Nn_p(t)} \frac{d}{dt} u_{kp\_cap}^\Sigma(t) \\ i_{kn}(t) = \frac{C_{SM}}{Nn_n(t)} \frac{d}{dt} u_{kn\_cap}^\Sigma(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中： $u_{kp\_cap}^\Sigma$ 、 $u_{kn\_cap}^\Sigma$  分别为  $k$  相上、下桥臂所有子模块电容电压之和； $C_{SM}$  为子模块电容值； $n_p(t)$ 、 $n_n(t)$  分别为  $k$  相上、下桥臂子模块投入系数，考虑桥臂子模块数量足够多时，投入系数可以表示为

$$\begin{cases} n_p(t) = \frac{1 - m \sin(\omega t)}{2} \\ n_n(t) = \frac{1 + m \sin(\omega t)}{2} \end{cases} \quad (7)$$

考虑桥臂等效电阻时，式(6)改写为

$$\begin{cases} i_{kp}(t) = \frac{C_{SM}}{Nn_p(t)} \frac{d}{dt} u_{kp\_cap}^\Sigma(t) + \frac{u_{kp\_cap}^\Sigma(t)}{Nn_p(t)R_0} \\ i_{kn}(t) = \frac{C_{SM}}{Nn_n(t)} \frac{d}{dt} u_{kn\_cap}^\Sigma(t) + \frac{u_{kn\_cap}^\Sigma(t)}{Nn_n(t)R_0} \end{cases} \quad (8)$$

将式(5)和(8)代入式(4)，可得

$$p_k = \frac{C_{SM}}{2N} \frac{d}{dt} [(u_{kp\_cap}^\Sigma)^2 + (u_{kn\_cap}^\Sigma)^2] + \frac{(u_{kp\_cap}^\Sigma)^2 + (u_{kn\_cap}^\Sigma)^2}{NR_0} \quad (9)$$

正常工作时，MMC 上下桥臂子模块电容电压之和应保持为直流电压值；但由于子模块电容电压波动，因此上、下桥臂电压中含有二倍频波动<sup>[19]</sup>，即

$$\begin{cases} u_{kp}^\Sigma = U_{dc} + \Delta u_{k2f} \\ u_{kn}^\Sigma = U_{dc} - \Delta u_{k2f} \end{cases} \quad (10)$$

式中  $\Delta u_{k2f} = \Delta U_{k2f} \cos(2\omega t + \theta)$  为子模块电容电压波动引起的二倍频波动(考虑 MMC 电容平衡控制能使每个桥臂子模块电容电压波动基本一致)。

因此，将式(10)代入式(9)，可得

$$p_k = \frac{C_{SM}}{N} \frac{d}{dt} (U_{dc}^2 + \Delta u_{k2f}^2) + \frac{2(U_{dc}^2 + \Delta u_{k2f}^2)}{NR_{loss}} \quad (11)$$

又因为三相二倍频电压波动量的平方之和为

$$\begin{aligned} \sum_{k=a,b,c} \Delta u_{k2f}^2 &= (\Delta U_{k2f})^2 [\cos^2(2\omega t + \theta) + \\ &\cos^2(2\omega t + \theta - 240^\circ) + \\ &\cos^2(2\omega t + \theta + 240^\circ)] = \frac{3}{2} (\Delta U_{k2f})^2 \end{aligned} \quad (12)$$

考虑 MMC 电容平衡算法能较好的抑制子模块电容电压波动，即  $\Delta U_{k2f}$  较小，可以忽略其平方项  $(\Delta U_{k2f})^2$ 。因此，稳态运行时 MMC 三相桥臂瞬时功率之和为

$$p_{abc}^\Sigma = \sum_{k=a,b,c} p_k = \frac{C_{SM}}{N} \frac{d}{dt} U_{dc}^2 + \frac{2}{NR_{loss}} U_{dc}^2 \quad (13)$$

MMC 通过对投入子模块电容进行充放电，实现交流侧和直流侧之间能量的传递和交换。由式(13)可知，稳态时 MMC 三相桥臂瞬时功率之和为恒定值，且与直流电压平方成比例关系。因此本文提出了一种基于直流电压平方的下垂控制策略，实现对 MMC 直流电压和功率的有效控制。

## 2 改进直流电压下垂控制策略

### 2.1 VSC-MTDC 拓扑结构

VSC-MTDC 采用电压源型换流器，在稳态运行时需要保持系统直流电压恒定，因此系统接线方式一般为并联形式，即保证所有换流器工作在相同直流电压水平条件下。并联多端直流系统网络有 2 种基本拓扑结构<sup>[9,20]</sup>，一种是星型拓扑，另外一种为环型拓扑，分别如图 2(a)和(b)所示。而其它复杂的结构都可以看作是这 2 种结构的扩展或者组合<sup>[9]</sup>。由于接线方式不具规律性，换流站直流侧存在与多个换流站连接的可能，因此相比于星型拓扑，环型拓扑中各直流线路上的潮流不易控制，直流线路参数及保护设计难度加大<sup>[20]</sup>。星型结构中各换流站直流电流控制相对独立，有利于实现直流网络的功率平衡控制，提高整个多端直流系统稳定性，同时也有利于多端协调控制策略的实现。因此本文基于星型拓扑的 VSC-MTDC 系统进行说明和分析。

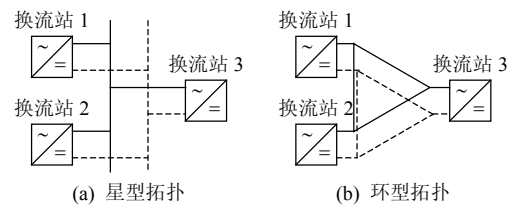


图 2 并联多端系统拓扑

Fig. 2 Topology of parallel connected MTDC

### 2.2 改进直流电压下垂控制

由于电压源换流器可以独立控制有功和无功功率，因此 VSC-MTDC 中换流站既可以作为整流站运行，也可以作为逆变站运行；但为了维持系统稳定运行，必须保证 VSC-MTDC 系统中各换流站

交流侧输入和输出有功功率的平衡,即

$$\sum P_{\text{rec}} + \sum P_{\text{inv}} + P_{\text{losses}} = 0 \quad (14)$$

式中:  $P_{\text{rec}}$  和  $P_{\text{inv}}$  分别为 VSC-MTDC 中所有整流站和所有逆变站在其交流侧公共耦合点(point of common coupling, PCC)处注入到交流系统的有功功率,定义功率流向交流侧为正,流向直流侧为负;  $P_{\text{losses}}$  为多端系统中所有换流器损耗( $p_{\text{loss}}$ )之和以及系统中所有直流线路的功率损耗。

由式(14)可知:当多端系统中输入有功功率值大于输出有功功率值,多端系统直流电压值将增大;而随着直流电压升高,各换流器会降低输入系统的功率值,使系统重新进入功率平衡状态。反之则升高换流器直流传输值,使系统功率重新平衡。

由以上分析可知:VSC-MTDC 系统中直流电压与系统功率平衡直接相关,这与交流系统中的频率类似。考虑 VSC-MTDC 拓扑采用并联结构,因此当各个换流站功率指令为零时,应保证所有换流站端口直流电压值与其额定值相等;而当直流系统中有潮流时,由于直流线路上的压降各换流站端口直流电压而略有不同,但差异不大。参考交流系统中发电机转子频率作为系统功率平衡参考,在多端系统中引入一个公共直流参考电压  $U_{\text{DC\_common}}$  作为 VSC-MTDC 系统参考电压,也可作为多端系统功率平衡的参考。本文中公共直流参考电压选择为多端系统中的平衡换流站(即直流电压控制换流站)直流侧端口电压。

图3为本文所提出的改进直流电压下垂控制原理框图。其中,  $D_i$  为第  $i$  个换流站的下垂系数;  $i_d^{\text{ref}}$  是由外环传递到内环的有功类参考值。当多端系统中有换流站退出运行时,直流电压下垂控制将产生功率控制附加信号,实现正常工作换流站的功率紧急输送,快速恢复多端系统功率平衡。正常工作时,此附加信号为零,保证换流站按照上层功率指令输出功率,提高系统运行的高效性。

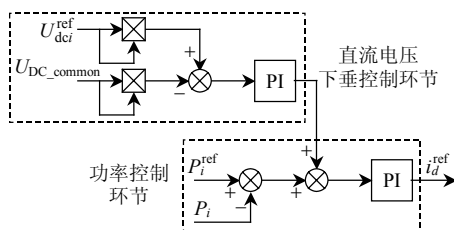


图3 改进直流电压下垂控制策略

Fig.3 Improved DC voltage droop control

## 2.3 多端系统功率动态响应分析

考虑 VSC-MTDC 系统中共有  $m$  个换流站。定义  $P_i$  是第  $i$  ( $1 \leq i \leq m$ ) 个换流站在其交流侧 PCC 处的有功功率,  $P_i^{\text{ref}}$  是该换流站的功率指令值。为了保证多端系统功率平衡,应保证所有换流站的有功功率指令值之和为零,即

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m P_j^{\text{ref}} = 0 \\ P_i^{\text{min}} \leq P_i^{\text{ref}} \leq P_i^{\text{max}} \end{cases} \quad (15)$$

式中  $P_i^{\text{min}}$  和  $P_i^{\text{max}}$  为第  $i$  个换流站功率运行区间所确定的最小和最大有功功率指令值。

因此,当 VSC-MTDC 系统稳定运行时,根据系统功率平衡关系可知多端系统中有功功率的总损耗:

$$P_{\text{losses}} = -\sum_{j=1}^m P_j \quad (16)$$

由图3可知,换流站稳态时,有功功率与直流端口电压有如下关系:

$$\sum_{j=1}^m (P_j - P_j^{\text{ref}}) + [U_{\text{DC\_common}}^2 - (U_{\text{dci}}^{\text{ref}})^2] \sum_{j=1}^m D_j = 0 \quad (17)$$

结合式(16)和(17),可得

$$U_{\text{DC\_common}}^2 - (U_{\text{dci}}^{\text{ref}})^2 = \frac{-P_{\text{losses}}}{\sum_{j=1}^m D_j} \quad (18)$$

$$P_i = P_i^{\text{ref}} - \frac{D_i P_{\text{losses}}}{\sum_{j=1}^m D_j} \quad (19)$$

换流站下垂系数的选择通常根据换流站的容量来确定,使得  $D_j S_j = D_i S_i (\forall i \neq j)$ , 其中  $S_i$  为第  $i$  个换流站的容量。这样可以使容量较大的换流站更多地参与 VSC-MTDC 系统的直流电压控制。当所有换流站的额定容量相等时,它们的下垂系数也一致。这种情况下,由式(20)可知每个换流站的实际有功功率与功率指令间有  $P_{\text{losses}}/m$  的偏差,即每个换流站都会承担相等的系统功率损耗,而不会只由直流电压控制换流站全部承担。

另外,当一个换流站发生事故或由于检修需退出运行瞬间,剩余换流站可以自动分配去承担系统功率缺额,而不会只由直流电压控制换流站全部承担功率缺额,使 VSC-MTDC 响应速度更快。不妨设第  $m$  个站退出运行,则该换流站退出运行后瞬间

剩余换流站直流电压和功率关系为

$$U_{DC\_common}^2 - (U_{dc1}^{ref})^2 = -\frac{P'_{losses} - P_n^{ref}}{\sum_j^{m-1} D_j} \quad (20)$$

$$P'_i = P_i^{ref} + D_i \frac{-P'_{losses} + P_m^{ref}}{\sum_j^{m-1} D_j} \quad (21)$$

考虑所有换流站容量相等，则其它  $m-1$  个换流站在第  $m$  个换流站退出运行前后功率差额为

$$\Delta P_j = P'_j - P_j = \frac{P_{losses}}{m} - \frac{P'_{losses}}{m-1} + \frac{P_m^{ref}}{m-1} \quad (22)$$

由式(22)可知，在本文提出的直流电压下垂控制作用下，剩余  $m-1$  个正常工作换流站将平均承担退出换流站造成的功率缺额；而当换流站容量不同时，正常运行换流站所分担的功率缺额与其容量成正比。由此可知，本文提出直流电压控制策略在换流站退出运行后可实现功率紧急输送，快速恢复系统功率平衡，从而有效地抑制多端系统中由于功率缺额造成的暂态过电压或者电压跌落。

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真模型

在 PSCAD/EMTDC 中搭建了如图 2(a)所示的三端 VSC-MTDC 系统，并将本文提出直流电压下垂控制策略应用于图中三端 VSC-MTDC 系统。通过对三端系统在稳态和交流侧故障态下运行特性分析仿真分析，验证本文提出的直流电压下垂控制策略的有效性。仿真模型中换流器采用 MMC，三个换流站参数一致，其中一个换流站单线图如图 4 所示，而其主要参数如表 1 所示。

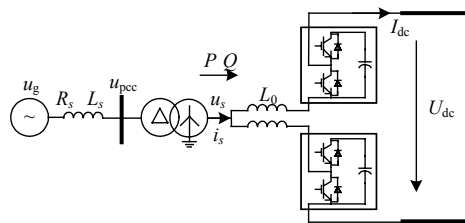


图 4 MMC 系统单站示意图

Fig. 4 Schematic of single MMC station

假设模型中直流电缆的平均电阻为  $0.01 \Omega/\text{km}$ ，电缆长度均为  $50 \text{ km}$ ；各个换流站级控制策略均采用矢量控制。在图 2(a)所示多端系统中，换流站 1 采用定直流电压控制，而换流站 2 和 3 采用的是本文提出的直流电压下垂控制策略。

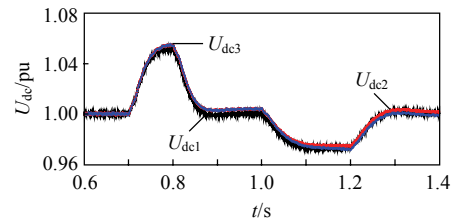
表 1 仿真系统主要参数

Tab 1 The main parameters of the simulation system

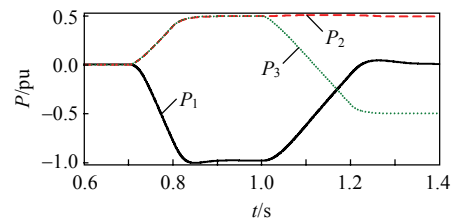
项目	参数
额定容量 $S_N/\text{MVA}$	1 000
额定功率 $P_N/\text{MW}$	1 000
额定直流电压 $U_{DCN}/\text{kV}$	$\pm 320$
等值电阻 $R_j/\Omega$	0.98
等值电感 $L_j/\text{mH}$	1.2
联结变压器变比/(kV/kV)	220/330
联结变压器漏抗 $u_k/\text{pu}$	0.1
桥臂电抗 $L_0/\text{mH}$	138.6
桥臂等效电阻 $R_0/\Omega$	0.1
子模块电容器 $C_0/\mu\text{F}$	7 000
子模块额定电压 $U_0/\text{kV}$	1.6
单桥臂子模块数 $N$	424

#### 3.2 稳态仿真分析

当多端系统中无功率传输时，各个换流站直流电压相等，为系统额定电压；当  $0.7 \text{ s}$  时，换流站 2 和 3 的直流功率指令  $P^{ref}$  都设定为  $0.5 \text{ pu}$ ；在  $1.0 \text{ s}$  时，VSC3 的有功功率指令  $P_3^{ref}$  设定为  $-0.5 \text{ pu}$ 。仿真结果如图 5 所示(图中直流电压和有功功率均采用标么值，下同)。



(a) 3 个换流站直流电压



(b) 3 个换流站有功功率

图 5 稳态时多端系统动态响应

Fig. 5 Dynamic response of the VSC-MTDC system under steady state

由图 5 可知：加入本文所提改进直流电压下垂控制策略，VSC-MTDC 中各换流站能够快速跟踪其指令值；同时使得多个换流站同时参与直流电压控制，避免系统直流电压出现过大瞬时过电压或电压跌落，同时该策略可以使得 VSC-MTDC 系统直流电压快速恢复至额定值附近。由图 3 可知，非直流电压控制换流站直流端口电压均以直流电压

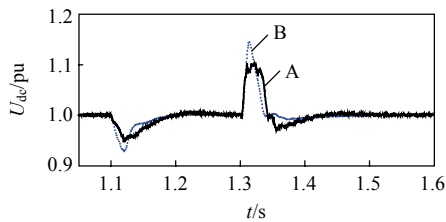
控制换流站直流电压作为参考进行调节,因此采用本文提出策略可以使得非直流电压控制换流站直流端口电压与直流电压控制换流站直流电压基本一致,因此直流电压控制换流站端口直流电压可以看作 VSC-MTDC 系统的直流电压。

### 3.3 暂态仿真分析

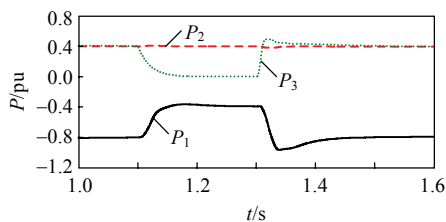
稳态运行时,考虑换流站 2 和 3 的有功功率指令  $P^{ref}$  都设定为 0.4 pu。

1) VSC 3 交流侧三相瞬时接地。

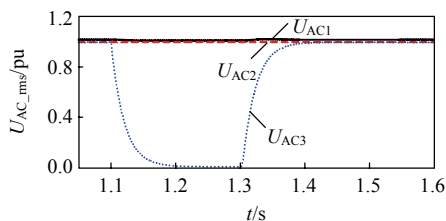
多端系统协调控制策略若选择不当,在交流侧故障时将导致 VSC-MTDC 站间功率振荡或系统失稳。三相接地故障是交流系统中最严重的故障,因此本文通过在 VSC 交流侧施加三相瞬时接地故障验证本文提出控制策略在暂态情况下的有效性。在 1.1 s 时 VSC 3 交流侧发生三相瞬时接地故障,故障持续 200 ms。仿真波形如图 6 所示。图 6(a)中曲线 A 为采用本文改进下垂控制得到的 VSC1 端口直流电压响应曲线,曲线 B 为采用文献[14]中下垂控制得到的 VSC1 直流电压响应曲线。



(a) 站 1 直流电压



(b) 3 个换流站有功功率



(c) 3 个换流站交流电压有效值

图 6 三相接地故障多端系统动态响应

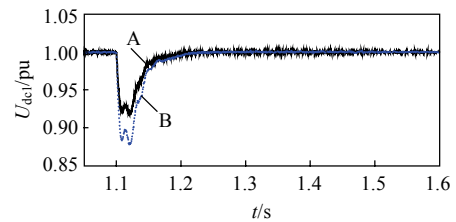
Fig. 6 Dynamic response of the VSC-MTDC system under three-phase-to-ground fault

由图 6 可知:当 VSC 交流侧发生三相接地故障时,采用本文提出控制策略可以有效减小 VSC-

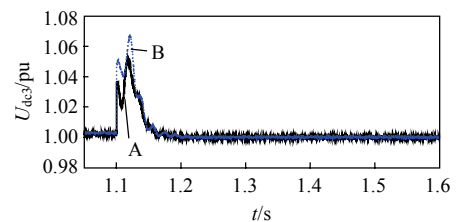
MTDC 系统直流电压波动,保证暂态过电压不会超过系统主设备的绝缘裕度,避免 VSC-MTDC 因过电压而停运。由图 6(b)知暂态过程中,各 VSC 交流侧电压有效值和有关功率变化平稳,波动较小。因此,本文提出的改进下垂控制策略还可有效地抑制交流侧故障而引起的直流系统功率振荡,提高多端系统运行的稳定性。

2) VSC 1 主动退出运行。

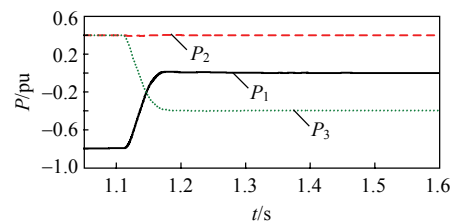
为了验证加入本文提出改进直流电压控制策略后 VSC-MTDC 是否满足  $N-1$  法则,考虑系统稳定运行时直流电压控制换流站 VSC1 在 1.1 s 时主动退出多端系统运行,VSC3 切换为直流电压控制方式,维持系统直流电压。仿真波形如图 7 所示。图 7(a)和(b)分别比较了采用本文所提控制策略和采用文献[14]所提下垂控制作用下 VSC1 和 VSC3 端口直流电压暂态响应曲线(图中曲线 A 为采用本文方法得到的响应曲线,曲线 B 为采用文献[14]得到的响应曲线)。VSC2 端口直流电压与 VSC3 基本一致。图 7(c)为 VSC-MTDC 各站有功功率响应曲线。



(a) 站 1 直流电压



(b) 站 3 直流电压



(c) 3 个换流站有功功率

图 7 MMC 1 退出运行后多端系统动态响应

Fig. 7 Dynamic response of the VSC-MTDC system after MMC 1 quit out

VSC-MTDC 稳态运行时,直流电压控制换流站退出运行对多端系统影响最严重。采用本文提出

改进直流电压下垂控制策略在换流站退出运行后, 剩余换流站能按照其容量等比例承担多端系统中的功率缺额, 避免换流站出现较大过电压或电压跌落, 并快速恢复剩余系统的功率平衡和直流电压返回额定值附近, 保证 VSC-MTDC 系统继续稳定运行。仿真结果验证了本文提出改进下垂控制策略可以快速、有效地完成功率紧急输送和直流电压恢复, 提高 VSC-MTDC 系统运行稳定性。

## 4 结论

1) 本文提出了一种基于 MMC 的多端柔性直流输电系统改进直流电压下垂控制策略, 通过非直流电压控制换流站中引入一个基于公共直流参考电压的附加直流电压下垂控制环节, 提高了 VSC-MTDC 系统的动态响应速度和换流站故障穿越能力。

2) 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了三端 VSC-MTDC 模型, 验证了所提出改进控制策略在稳态时有功功率调度和换流站交流侧三相故障情况下的有效性, 并与传统下垂控制作用下的 VSC-MTDC 直流电压响应曲线进行了比较。仿真结果表明本文提出控制策略可以有效地抑制换流站交流侧故障引起的直流侧功率和电压振荡, 提高整个 VSC-MTDC 系统运行稳定性。

3) 根据 VSC-MTDC 系统安全运行  $N-1$  法则进一步验证了系统当一个换流站退出运行后, 该策略可以有效地抑制 VSC-MTDC 系统直流电压发生较大过电压和电压跌落, 实现 VSC-MTDC 中换流站退出运行后站间功率的紧急输送, 快速恢复剩余换流站功率平衡, 保证剩余系统继续正常运行。

## 参考文献

- [1] 张文亮, 汤涌, 曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 1-6.  
Zhang Wenliang, Tang Yong, Zeng Nanchao. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 1-6(in Chinese).
- [2] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.  
Zhang Liying, Ye Tinglu, Xin Yaozhong. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9(in Chinese).
- [3] 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.  
Tang Guangfu, He Zhiyuan, Teng Letian. New progress on HVDC technology based on voltage source converter[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 39-44(in Chinese).
- [4] Xu L, Williams B W, Yao L Z. Multi-terminal DC transmission systems for connecting large offshore wind farms[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting, Conversion and Delivery of Electrical Energy in 21st Century. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2008: 1-5.
- [5] 吴俊宏, 艾芊. 多端柔性直流输电系统在风电场中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 22-27.  
Wu Junhong, Ai Qian. Research on multiterminal VSC-HVDC system for wind-farms[J]. Power System Technology. 2009, 33(4): 22-27(in Chinese).
- [6] Taggart S, James G, Dong Z, et al. The future of renewables linked by a transnational Asian grid[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(2): 348-359.
- [7] Dorn J, Huang H, Retzmann D. A new multilevel voltage-sourced converter topology for HVDC applications[C]//CIGRE Session: International Council on Large Electric Systems. Paris, France: CIGRE, 2008: 1-8.
- [8] Flourentzou N, Agelidis V G, Demetriades G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [9] Lu W X, Ooi B T. DC overvoltage control during loss of converter in multiterminal voltage-source converter-based HVDC(M-VSC-HVDC)[C]//37th Annual Conference of the IEEE Industrial-Electronics-Society. Melbourne, Australia: IEEE, 2011: 915-920.
- [10] Xu L, Yao L Z. DC voltage control and power dispatch of a multi-terminal HVDC system for integrating large offshore wind farms[J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 5(3): 223-233.
- [11] Bellmunt O G, Liang J, Ekanayake J, et al. Topologies of multiterminal HVDC-VSC transmission for large offshore wind farms[J]. Electric Power System Research, 2011, 81: 271-281.
- [12] Haileselassie T M, Molinas M. Multi-terminal VSC-HVDC system for integration of offshore wind farms and green electrification of platforms in the Northsea[C]//Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics. Espoo, 2008: 1-8.
- [13] Pinto R T, Bauer P, Rodrigues S F, et al. A novel distributed direct voltage control strategy for grid integration of offshore wind energy systems through MTDC network[J]. IEEE Transactions on Industrial

- Electronics, 2013, 60(6): 2429-2441.
- [14] Haileselassie T M, Uhlen K. Impact of DC line voltage droops on power flow of MTDC using droop control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1441-1449.
- [15] Dierckxsens C, Srivastava K, Reza M, et al. A distributed DC voltage control method for VSC MTDC systems[J]. Electric Power System Research, 2012, 82: 54-58.
- [16] Pinto R, Rodrigues S F, Bauer P, et al. Comparison of direct voltage control methods of multi-terminal DC (MTDC) networks through modular dynamic models[C]// Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). Birmingham: IEEE, 2011: 1-10.
- [17] Antonopoulos A, Angquist L, Nee H-P. On dynamics and voltage control of the modular multilevel converter [C]//European Power Electronics and Applications Conference (EPE). Barcelona, Spain: IEEE, 2009: 1-10.
- [18] Angquist L, Antonopoulos A, Siemaszko D. Open-loop control of modular multilevel converters using estimation of stored energy[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(6): 2516-2524.
- [19] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平电压源换流器的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 1-8.  
Wang Shanshan, Zhou Xiaoxin, Tang Guangfu, et al. Modeling of modular multilevel voltage source converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 1-8(in Chinese).
- [20] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 118-120.  
Tang Guangfu. High voltage direct current transmission based on voltage sourced converter[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010: 118-120(in Chinese).



阎发友

收稿日期: 2013-04-24。

作者简介:

阎发友(1987), 男, 博士研究生, 研究方向为多端高压直流输电系统控制及保护技术, yanfayou@sgri.sgcc.com.cn;

汤广福(1966), 男, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 研究方向为 FACTS、HVDC 及其相关试验方法;

贺之渊(1977), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为 FACTS、HVDC 及其相关试验方法;

孔明(1986), 男, 博士研究生, 研究方向为电压源换相高压直流输电系统控制保护技术。

(责任编辑 张玉荣)