

# 多端柔性直流输电系统交流故障穿越仿真研究

张世豪<sup>1</sup>, 石若林<sup>2</sup>, 丁义轩<sup>3</sup>

(1. 华北水利水电大学电气工程学院, 河南 郑州 450000; 2. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610000; 3. 国网河南省电力公司超高压公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:**针对多端柔性直流输电系统交流侧发生故障, 直流系统与电网公共连接点电压也随之跌落的问题, 文中提出了一种交流故障穿越技术来维持公共连接点电压稳定。根据公共连接点电压跌落程度增发相应的无功功率从而维持公共连接点的电压稳定, 保证系统的有功功率传输。当公共连接点电压跌落程度较大时, 增发的无功功率导致交流系统过电流, 提出通过降低故障端的有功功率参考值, 从而减小交流侧电流幅值, 避免过电流的产生。同时, 针对有功功率的减小将使系统的不平衡功率进一步增大导致直流电压发生较大波动的现象, 通过定直流电压换流站根据直流电压的变化来消纳系统的不平衡功率, 从而达到维持多端柔性直流输电系统直流电压稳定的目的。

**关键词:**多端柔性直流输电; 交流故障穿越; 公共连接点; 过电流限制; 功率平衡; 直流电压稳定

**中图分类号:**TM 721.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)01-0043-07

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230108

## Simulation Research on AC Fault Ride-through of MMC-MTDC Transmission System

ZHANG Shihao<sup>1</sup>, SHI Ruolin<sup>2</sup>, DING Yixuan<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450000, Henan, China; 2. Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610000, Sichuan, China; 3. State Grid Henan Extra High Voltage Company, Zhengzhou 450000, Henan, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that when failures occur in AC side of MMC-MTDC system, the voltage at the point of common coupling (PCC) between DC system and power grid also drops, an AC fault ride-through technology is proposed to maintain voltage stability of PCC. According to the voltage sag degree of PCC, the corresponding reactive power is increased to maintain the voltage stability of PCC and ensure the active power transmission of the system. When the voltage sag of PCC is large, the additional reactive power will cause the overcurrent of AC system. So it is proposed to reduce the reference value of active power at the fault end, thus reducing the current amplitude in AC side and avoiding the generation of overcurrent. At the same time, in view of the phenomenon that the reduction of active power will further increase the unbalanced power of the system, resulting in large fluctuations in DC voltage, the unbalanced power of the system is absorbed by the constant DC voltage converter station based on the change of DC voltage, thereby to achieve the purpose of maintaining DC voltage stability of multi-terminal flexible DC transmission system.

**Key words:** MMC-MTDC transmission; AC fault ride-through; point of common coupling; overcurrent limit; power balance; DC voltage stabilization

## 0 引言

随着电力系统能源结构比例不断的优化调节以及国家大力提倡清洁能源的开发利用, 使得以风电

和光伏为主体的新能源参与电网的程度越来越大。但新能源所存在的弊端也是较为明显, 其大多分布在较为偏远的地区。随着输电距离的不断加大, 采用交流输电和传统直流输电形式在输送新能源上存在着各种各样的问题, 也无法隔绝新能源发电对

电网造成的影响<sup>[1]</sup>。基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流输电技术,以不存在换相失败问题、能同时独立地控制有功功率和无功功率、占地面积小等优点,成为风电等新能源接入电网的发展目标<sup>[2]</sup>。而多端柔性直流输电系统凭借着多个供电电源、多个受电端的特性使其在电力系统中的比例越来越大<sup>[3-5]</sup>。

交流系统发生故障时,换流站与其接入交流电网的公共连接点(point of common coupling, PCC)<sup>[6-7]</sup>电压发生跌落。交流故障穿越能力则是指柔性直流输电系统应该在此时充分发挥其控制的灵活性,使换流站能维持与直流电网的连接,尽量保证不脱网持续运行,并保持一定功率输送的能力<sup>[8]</sup>。受端电网发生交流故障时,受端换流器控制能力受到影响,导致直流电压发生波动,对电力系统稳定性造成冲击<sup>[9]</sup>。在交流故障发生后,若不采取有效的控制措施,系统的不平衡功率会导致直流电压发生波动,威胁整个系统的安全运行<sup>[10]</sup>。

文献[11]提出了一种基于动态电流限幅控制的增发无功功率策略来维持故障点电压稳定,同时在直流侧设计了一款辅助电路用来消耗系统多余的不平衡功率,从而保持直流电压的稳定。文献[12]设计了一种多端柔直系统功率自动协调控制策略:交流故障时,故障侧的换流器优先进行无功的补偿,其他站通过协调控制策略对有功进行分配,维持直流电压稳定。文献[13]提出了一种不依赖站间通信的低电压穿越控制策略,交流故障时换流器通过感应直流电压变化量切换控制模式。文献[14-15]对南澳直流工程的调度策略进行分析,提出分段式定有功功率的控制策略,缩小分段可使功率更好地跟随风电场出力。文献[16-17]通过对舟山柔直工程的运行方式、控制模式以及控制保护策略的介绍,指出了控制策略的设计对交流故障穿越的重要性。文献[18-19]对张北柔直工程的交流故障穿越的控制策略进行分析,提出环形直流电网提高了工程运行的灵活性和可靠性,设计相关控制策略极大地提高了故障穿越能力。文献[20]提出了基于电流故障相似度和 Teager 能量算子瞬时能量两种保护方法相结合的控制策略,设计了多端柔直电网保护的整体方案。文献[21]通过对多端柔性直流输电系统的运行状态方程进行数学建模,设计了适用于不同场合的双闭环控制器,同时针对四端系统的控制

策略提出了比例模式、优先模式以及比例-优先模式 3 种控制策略来进行故障穿越。文献[22]针对下垂控制中换流站过载时功率失衡和电压失稳的情况,提出了引入斜率和直流电压控制的改进控制策略,又对环形 MMC-MTDC 系统中控制特性曲线拐点处参考值的确定给出了计算方法。文献[23]针对整流侧发生三相不对称故障导致电压跌落、直流母线电压失稳的情况,采用了 T4 延时法并设计了三相锁相环来消除负序电流;并提出了一种维持直流电压稳定的控制策略,通过系统直流电压和逆变侧电流的变化控制系统自动切换算法,从而维持柔性直流输电系统直流电压的稳定。

上述文献在故障穿越时未考虑维持新能源风电场最大功率输出的同时保持系统直流电压稳定的问题。在以上文献的基础上,下面设计了新能源通过多端柔性直流输电系统并网时交流故障穿越的控制策略。在系统发生交流故障时,电网与换流站之间的 PCC 点电压跌落,故障端的换流站根据 PCC 点电压下降程度调整无功功率参考值,增发相应的无功功率来维持交流电网电压稳定,同时也使得交流电流幅值增大。当换流站增发的无功功率使交流系统电流超过额定值时,改变其有功功率参考值来降低有功功率,从而减小交流系统电流幅值。送电端风电输入的有功功率保持不变,受端有功功率的输出减小导致柔性直流系统不平衡功率增大,定直流电压换流站(抽水蓄能电站)根据直流电压-有功功率下垂曲线增大有功功率输出,消除系统不平衡功率,保证直流电压稳定,实现新能源风电场最大有功功率输出。

## 1 MMC 的工作原理与数学模型

### 1.1 MMC 的拓扑结构

MMC 的结构如图 1 所示。每个换流器共有 6 个桥臂,其中每个桥臂又是由 1 个电抗器和  $N$  个子模块串联组合而成。改变每个桥臂中的子模块个数可以改变桥臂的电压,桥臂中的电抗器还可以抑制相间环流和直流系统的故障电流冲击。

### 1.2 MMC 的工作原理

图 2 为柔性直流输电系统的单端基波等效电路和电压向量图。图中: $U_s$  和  $U_c$  分别为交流电网电压和 MMC 交流出口的电压; $\delta$  为  $U_c$  滞后于  $U_s$  的角度; $P$ 、 $Q$  分别为交流系统向 MMC 输入的有功、无功

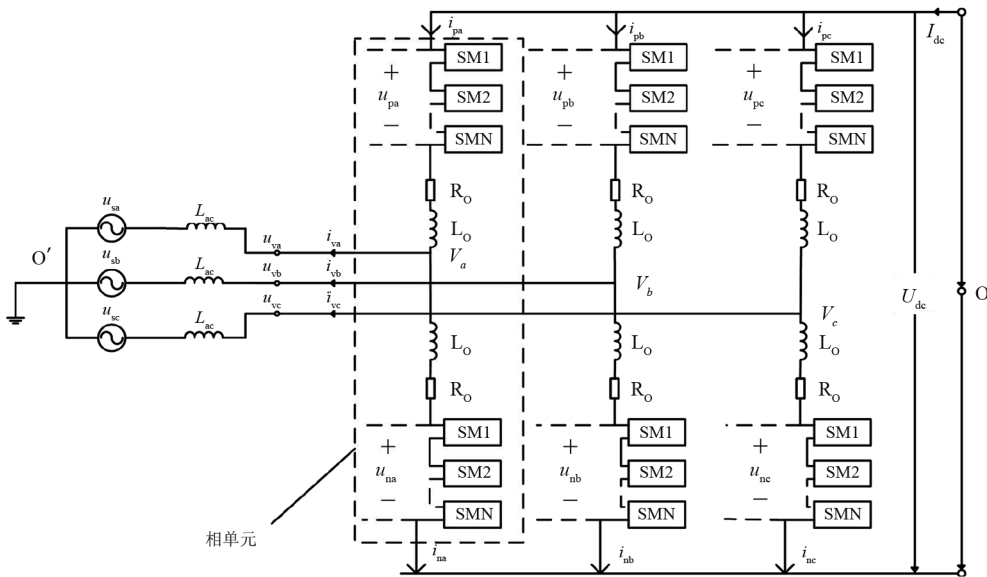


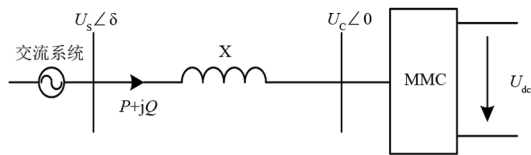
图 1 MMC 结构原理

功率,其数学模型为:

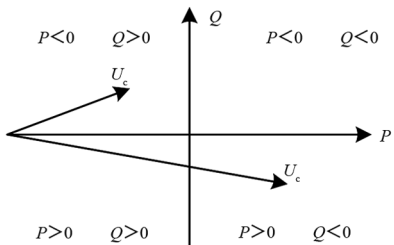
$$P = \frac{U_s U_c}{X} \sin \delta \quad (1)$$

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

由式(1)、式(2)可知,有功功率和无功功率的传输主要受控于角差  $\delta$  和  $U_s - U_c \cos \delta$ ; 当  $\delta > 0$  时,MMC 吸收有功功率,此时作为整流器;当  $\delta < 0$  时,MMC 发出有功功率,此时作为逆变器。当  $U_s - U_c \cos \delta > 0$  时,MMC 吸收无功功率;当  $U_s - U_c \cos \delta < 0$  时,MMC 发出无功功率。因此,通过改变  $\delta$  角和  $U_c$  就可以改变有功、无功功率的大小以及方向。



(a) MMC 基波等效电路



(b) MMC 基波向量

图 2 MMC 基波等效电路与向量

### 1.3 MMC 的数学模型

柔性直流输电系统一侧 MMC 的等效电路如图 3 所示。

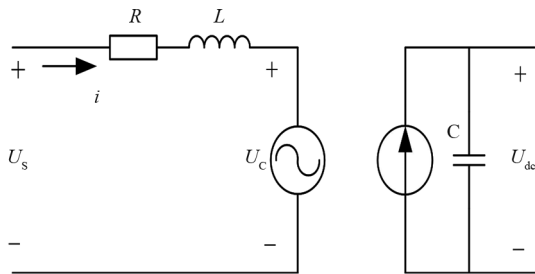


图 3 换流站等效电路

设三相交流系统的电压为:

$$\begin{cases} u_{sa} = U_s \cos \omega t \\ u_{sb} = U_s \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ u_{sc} = U_s \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (3)$$

设 MMC 交流侧输出电压为:

$$\begin{cases} u_{ca} = 0.5MU_{dc} \cos(\omega t + \delta) \\ u_{cb} = 0.5MU_{dc} \cos(\omega t - 2\pi/3 + \delta) \\ u_{cc} = 0.5MU_{dc} \cos(\omega t + 2\pi/3 + \delta) \end{cases} \quad (4)$$

对换流站的等效电路图进行分析可得电压状态方程的数学表达式为

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

为简化换流器的数学模型,需要对式(5)进行 Park 变换。

Park 变换矩阵及其逆矩阵为:

$$T_{3s-dq}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \sin \alpha & \sin(\alpha - 2\pi/3) & \sin(\alpha + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T_{dq-3s}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ \cos(\alpha - 2\pi/3) & \sin(\alpha - 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \sin(\alpha + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(5)经过 Park 变换后可得:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega L \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

整理上面的矩阵表达式可得

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = u_{sd} - Ri_d - u_{cd} - \omega Li_q \\ L \frac{di_q}{dt} = u_{sq} - Ri_q - u_{cq} + \omega Li_d \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $i_d$ 、 $i_q$  分别为交流系统电流的  $dq$  轴分量;  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$ 、 $u_{cd}$ 、 $u_{cq}$  分别为交流系统和 MMC 交流侧电压的  $dq$  轴分量。  $P_s$ 、 $Q_s$  在  $dq$  轴旋转坐标系下的表达式为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \\ Q_s = \frac{3}{2}(u_d i_q - u_q i_d) \end{cases} \quad (10)$$

假设  $d$  轴定位在交流系统电压向量上, 则交流系统电压向量在  $q$  轴上的分量为 0, 在  $d$  轴上的分量为  $U_s$ , 即  $u_d = U_s$ 、 $u_q = 0$ , 那么式(10)可表示为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}u_d i_d \\ Q_s = \frac{3}{2}u_q i_q \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知, 有功功率  $P_s$  只与  $d$  轴电流  $i_d$  有关, 无功功率  $Q_s$  只与  $q$  轴电流  $i_q$  有关, 有功、无功功率各自独立调节。通过控制  $d$  轴分量  $i_d$  和  $q$  轴分量  $i_q$  可实现对有功功率和无功功率的独立控制。

## 2 交流故障分析

图 4 为单端换流站交流系统。图中:  $U_s$  为交流电网相电压幅值;  $U_p$  为公共连接点相电压幅值;  $U_c$  为 MMC 交流侧相电压幅值。在  $dq$  坐标系下交流侧系统的数学模型为

$$U_p = U_s - (i_{sd} + j i_{sq})(R_s + j\omega L_s) \quad (12)$$

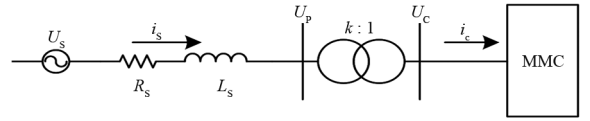


图 4 单端换流站交流系统

为简化计算, 可令  $U_s = U_s \angle 0^\circ$ , 且在柔性直流输电系统中  $L_s \gg R_s$ ,  $R_s$  可忽略不计, 故式(12)可简化为:

$$U_{pd} = U_s + \omega L_s i_{sq} \quad (13)$$

$$U_{pq} = -\omega L_s i_{sd} \quad (14)$$

由于  $U_c = U_p/k$ , 由式(10)可得:

$$i_{cd} = \frac{2k(P_s U_{pd} - Q_s U_{pq})}{3U_p^2} \quad (15)$$

$$i_{cq} = \frac{2k(P_s U_{pq} + Q_s U_{pd})}{3U_p^2} \quad (16)$$

由于  $i_s = i_c/k$ , 结合式(13)一式(16)可得

$$U_p = \sqrt{\left( U_s + \omega L_s \frac{i_{cq}}{k} \right)^2 + \left( \omega L_s \frac{i_{cd}}{k} \right)^2} \quad (17)$$

联立式(15)、式(16)、式(17)可得:

$$U_{pd} = \frac{3U_s U_p^2 (3U_p^2 - 2\omega L_s Q_s)}{\omega^2 L_s^2 \left[ \left( \frac{3U_p^2}{\omega L_s} - 2Q_s \right)^2 + 4P_s^2 \right]} \quad (18)$$

$$U_{pq} = \frac{-6P_s U_s U_p^2}{\omega L_s \left[ \left( \frac{3U_p^2}{\omega L_s} - 2Q_s \right)^2 + 4P_s^2 \right]} \quad (19)$$

$$U_p = \sqrt{\left[ U_s + \frac{2\omega L_s}{3U_p^2} (P_s U_{pq} + Q_s U_{pd}) \right]^2 + \left[ \frac{2\omega L_s}{3U_p^2} (P_s U_{pd} - Q_s U_{pq}) \right]^2} \quad (20)$$

化简可得

$$Q_s = -\frac{3U_s U_{pd}}{2\omega L_s} \pm \sqrt{U_{pq} \left( \frac{4\omega L_s P_s U_s}{3U_p^2} - U_s^2 \right) + \frac{4}{9} \omega^2 L_s^2 U_p^2 + U_p^4} \quad (21)$$

式(21)为发生交流故障 PCC 点电压降落时, 系统需要增发的无功功率与交流系统电压幅值、PCC 点电压幅值以及有功功率之间的关系, 可为发生交流故障时无功功率增发量的确定提供理论依据。式(21)中的“ $\pm$ ”号在送端换流站发生交流故障时取正, 在受端换流站发生交流故障时取负。

当增发的无功功率导致过电流时, 系统的有功功率为

$$P_s = \pm \sqrt{(\sqrt{3} U_p I_N)^2 - Q_s^2} \quad (22)$$

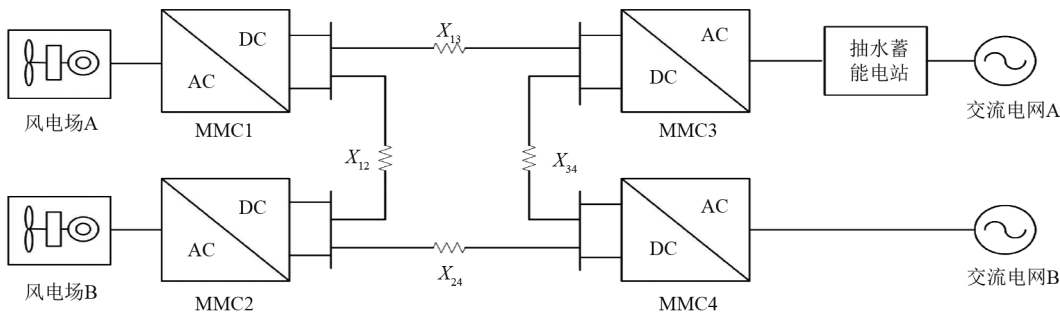


图 5 四端柔性直流输电系统模型

式中： $I_N$ 为交流系统的额定电流；“±”号选取与式(21)相同。当增发的无功功率导致流过换流器的电流超过幅值上限时,可根据式(22)减小有功功率的最大值。但有功功率的减小又会加大系统的有功功率不平衡,此时需要调整换流站的控制策略使有功功率平衡从而来维持系统直流电压的平衡。

### 3 多端柔性直流系统控制策略

所搭建的四端 MMC-MTDC 模型如图 5 所示。MMC1 和 MMC2 为送端换流站,其交流侧与风电场进行连接;MMC3 换流站作为功率调节站,交流侧接入与电网连接的抽水蓄能电站,对柔性直流系统的不平衡功率进行调节;MMC4 为受端换流站,向交流电网输送功率。

MMC-MTDC 系统主要采用多点直流电压控制的方式,常见的有:带电压裕度的下垂控制、主从控制、下垂控制等。

换流器外环功率控制器主要为有功功率、无功功率、频率、直流电压以及交流电压控制。换流站需要同时对有功、无功两类进行控制,所以控制系统就有多种组合。

#### 3.1 外环功率控制器设计

##### 3.1.1 定直流电压控制

柔性直流输电系统要求其直流电压保持在额定值附近,定直流电压控制是用直流电压参考值减去直流电压的实际值,并将结果进行 PI 调节后输入到内环电流控制器。控制框图如图 6 所示,其数学模型为

$$i_{dref} = (u_{dref} - u_{dc})K_{PI} \quad (23)$$

##### 3.1.2 定有功功率、无功功率控制

将有功、无功功率参考值与实际值求差,将差值进行 PI 调节后输入到内环电流控制器。控制框图

如图 7 所示,其数学模型为:

$$i_{dref} = (P_{ref} - P)K_{PI} \quad (24)$$

$$i_{qref} = (Q_{ref} - Q)K_{PI} \quad (25)$$

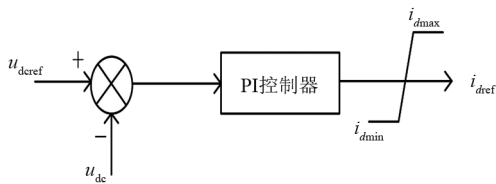


图 6 定直流电压控制

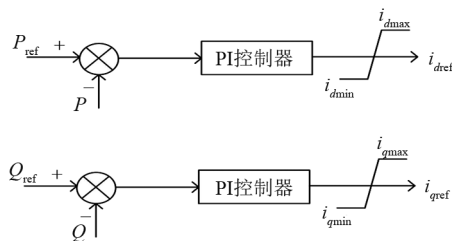


图 7 定有功、无功功率控制

#### 3.1.3 定交流电压、频率控制

定交流电压控制器和定频率控制器也是将参考值与实际值进行求差,将差值经过 PI 调节后输入到内环电流控制器。图 8 是其控制框图,数学模型为:

$$i_{qref} = (u_{sref} - u_s)K_{PI} \quad (26)$$

$$i_{dref} = (f_{ref} - f)K_{PI} \quad (27)$$

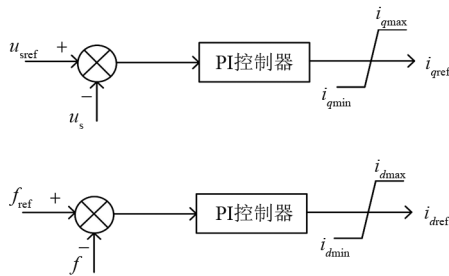


图 8 定交流电压、频率控制

#### 3.2 交流故障穿越控制策略

MMC4 连接的交流电网发生故障,公共连接点电压发生下降,MMC4 根据 PCC 点电压下降程度调整无功功率参考值,增发相应的无功电压来维持

PCC 点电压稳定。当 MMC4 增发的无功功率使得交流系统过电流时,通过降低有功功率的输出减小交流系统电流幅值,柔性直流系统通过定直流电压换流站的调节消除系统的不平衡功率,保证直流电压稳定。结合交流故障分析的原理推导,控制策略流程图如图 9 所示。

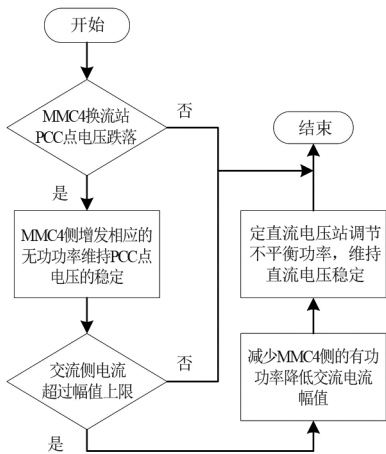


图 9 控制策略流程

## 4 仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 软件上搭建四端柔性直流系统的仿真模型,对所提的控制策略进行仿真并验证。交流系统的额定电流为 1.8 kA,多端柔性直流输电系统模型参数如表 1 所示。

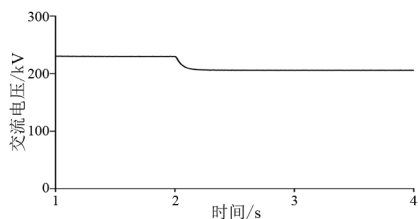
表 1 系统模型参数

换流站	有功控制	无功控制	参考值		
			$P_{ref}/\text{MW}$	$Q_{ref}/\text{Mvar}$	$U_{ref}/\text{kV}$
MMC1	定有功功率	定无功功率	500	0	—
MMC2	定有功功率	定无功功率	400	0	—
MMC3	定直流电压	定无功功率	—	0	630
MMC4	定有功功率	定无功功率	-600	0	—

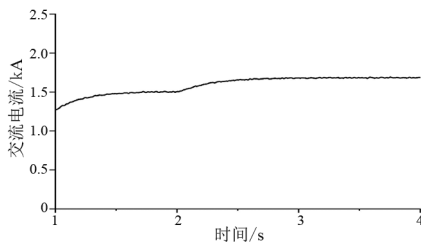
多端柔性直流系统在仿真 1 s 后逐渐开始趋于稳定。MMC4 换流站所连接的交流电网在 2 s 时发生故障,PCC 点电压降低 10%,此时若不采取相应的控制策略,故障端相关电气量的变化如图 10 所示。

MMC4 连接的交流电网在 2 s 时发生故障,PCC 点电压降低 10%,在 2.05 s 时启动交流故障穿越控制策略,根据式(21)计算可得 MMC4 换流站此时需要发出的无功功率  $Q_c = -356.032 \text{ Mvar}$ 。图 11 为启

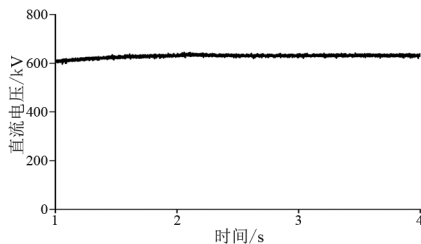
动交流故障穿越控制策略后故障端相关电气量的波形图。



(a) PCC点电压



(b) 交流侧电流



(c) 直流电压

图 10 不采取控制时故障端电气量波形

对比图 10 和图 11 可以知道:若不采取控制措施,PCC 点电压在 2 s 时跌落后则无法恢复,同时交流系统电流也由 1.5 kA 增大到 1.68 kA,交流电压的跌落则会导致有功功率不平衡、直流电压发生波动,凭借系统自身很难恢复到原来的运行状态;在 2.05 s 时启动交流故障穿越,根据图 11 显示,PCC 点交流电压很快恢复到原来的水平,直流电压也在很短时间内恢复到额定水平,由于增发了无功功率,导致交流电流进一步增大到 1.75 kA,但均未超过额定电流。

在增发无功功率时则会进一步增大交流系统电流,若 PCC 点电压跌落程度较大,增发的无功功率导致交流系统过电流,此时需要根据式(22)最小程度地减小有功功率的输出,从而降低交流电流幅值,避免系统产生过电流。

MMC4 换流站所连接的交流电网在 2 s 时 PCC 点电压跌落 15%,2.05 s 时 MMC4 换流站需要发出的无功功率  $Q_c = -553.152 \text{ Mvar}$ 。若不增加其他的控制策略,故障端相关电气量的变化如图 12 所示,

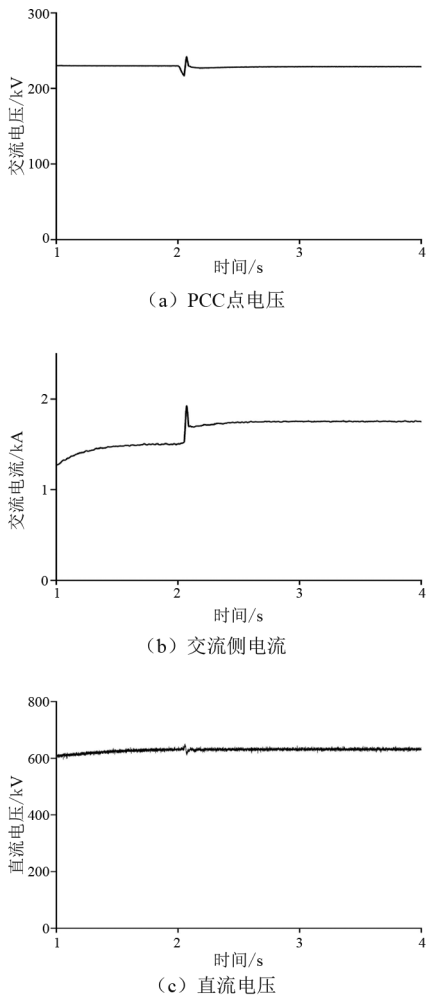


图 11 启动交流故障穿越策略后故障端电气量波形

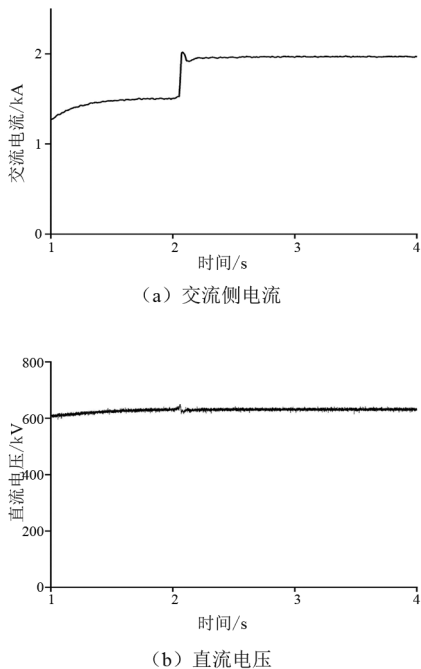


图 12 不增加其他控制时故障端电气量波形

此时交流系统电流上升幅度较大,由 1.5 kA 增加到

1.97 kA,超过了系统的额定电流,此时应通过增加相应的控制策略限制过电流从而达到维持交流系统稳定的目的。

此时根据式(22)计算得出不发生过电流的最大有功功率  $P_C = -460.10$  MW。根据上面的仿真在 2.05 s 时将 MMC4 侧有功功率的参考值由 -600 MW 变为 -460.1 MW。图 13 为降低有功功率后故障端相关电气量的波形图,交流电流由 1.97 kA 降低到了 1.796 kA,有效地避免了交流侧过电流的产生。

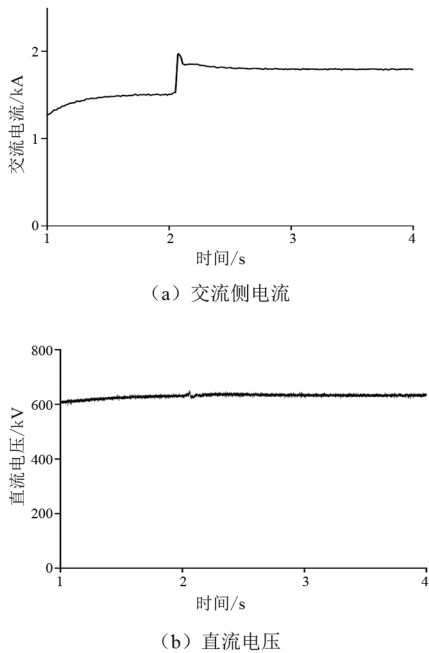


图 13 降低有功功率后故障端电气量的波形

有功功率的降低会进一步增大系统的不平衡功率,从而使直流电压发生更大的偏差。此时,作为定直流电压换流站的抽水蓄能电站,通过直流电压-有功功率下垂曲线增大有功功率的输出,在消纳不平衡功率维持直流电压稳定的同时实现新能源风电场最大有功功率输出。

### 5 结 论

在多端柔性直流输电系统交流侧发生故障时,针对因 PCC 点电压跌落导致一系列电网事故产生的问题,提出了一种交流故障穿越技术来维持 PCC 点电压的稳定。当 PCC 点电压发生跌落时,换流站通过增发无功功率来维持 PCC 点电压的稳定;当 PCC 点电压跌落程度较大时,增发的无功功率使交

(下转第 94 页)

限。应确保隔离开关更换或大修后的设备与未更换继续运行的设备回路电阻的一致性,降低设备发热缺陷机率。

#### 参考文献

- [1] 张丽娟.敞开式隔离开关发热故障分析及防范措施[J].山东电力技术,2019,46(2):46-49.
- [2] 滕松,刘新,李毅,等.电网中高压隔离开关触头接触温升实验测试分析[J].电子测量技术,2019,42(8):119-121.

(上接第 49 页)

流系统电流超过额定值,通过最小程度地减小有功功率的输出降低交流电流幅值,避免交流系统过电流。针对在受端有功功率输出减小、不平衡功率增大的现象,通过增大抽水蓄能电站有功功率的输出,保证新能源风电场最大功率输出,同时维持直流电压的稳定。最后,在 PSCAD/EMTDC 上搭建的四端柔性直流输电系统模型验证了所提控制策略的有效性。

#### 参考文献

- [1] 袁志昌,郭佩乾,刘国伟,等.新能源经柔性直流接入电网的控制与保护综述[J].高电压技术,2020,46(5):1460-1475.
- [2] 徐政.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2016:8-9.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 陈鹏,刘继春,余熙,等.混合三端直流输电系统应用于风电场并网的研究[J].可再生能源,2015,33(3):357-362.
- [6] 全国电力电子系统和设备标准化技术委员会.柔性直流输电换流器技术规范:GB/T 34139—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [7] 中国电力企业联合会.柔性直流输电术语:GB/T 40865—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [8] 周鑫.多端柔性直流输电系统故障穿越控制策略研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- [9] 黄伟煌,李明,刘涛,等.柔性直流输电受端交流侧故障下的控制策略[J].南方电网技术,2015,9(5):27-31.
- [10] 刘天琪,陶艳,李保宏.风电场经 MMC-MTDC 系统并网的几个关键问题[J].电网技术,2017,41(10):3251-3260.
- [11] 邱子鉴,刘晋,周鑫,等.多端柔性直流输电系统交流

- [3] 李振望.二分之三接线方式隔离开关烧毁原因分析[J].云南电力技术,2016,44(S2):103-104.
- [4] 黎斌.高压电气设计[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [5] 钟振蛟.户外隔离开关导电回路过热的原因及对策[J].高压电器,2005,41(4):307-309.

#### 作者简介:

王来源(1988),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统稳定性分析;

雷昌成(1990),男,学士,主要研究方向为电力系统稳定性分析。  
(收稿日期:2022-07-26)

故障穿越控制策略[J].华北电力大学学报(自然科学版),2021,48(6):32-40.

- [12] 邵冰冰,韩民晓,郭抒颖,等.多端柔性直流输电系统交流侧故障穿越功率协调控制[J].电力建设,2017,38(8):109-117.
- [13] 王岩,魏林君,高峰,等.光伏电站经柔性直流集电送出系统的低电压穿越协调控制策略[J].电力系统保护与控制,2017,45(14):70-78.
- [14] 蔡新雷.广东南澳多端柔性直流输电系统调度运行策略探讨[J].广东电力,2016,29(7):93-96.
- [15] 魏伟,许树楷,李岩,等.南澳多端柔性直流输电示范工程系统调试[J].南方电网技术,2015,9(1):73-77.
- [16] 董云龙,凌卫家,田杰,等.舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J].电力自动化设备,2016,36(7):169-175.
- [17] 高强,林焯,黄立超,等.舟山多端柔性直流输电工程综述[J].电网与清洁能源,2015,31(2):33-38.
- [18] 韩亮,白小会,陈波,等.张北±500 kV 柔性直流电网换流站控制保护系统设计[J].电力建设,2017,38(3):42-47.
- [19] 杜晓磊,郭庆雷,吴延坤,等.张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(9):164-173.
- [20] 高悦.基于 MMC-HVDC 的多端柔直电网继电保护新原理研究[D].西安:西安科技大学,2021.
- [21] 李向阳.多端柔性直流输电系统的控制方法研究[D].郑州:郑州大学,2017.
- [22] 任敬国,李可军,刘合金,等.基于改进定有功功率控制特性的 VSC-MTDC 系统仿真[J].电力系统自动化,2013,37(15):133-139.
- [23] 陈磊.MMC-HVDC 换流站控制与低电压穿越策略[D].合肥:合肥工业大学,2021.

#### 作者简介:

张世豪(1998),男,硕士研究生,研究方向为柔性直流输电技术;

石若林(1995),男,工程师,从事水力发电工作;

丁义轩(1994),男,工程师,从事超高压输电工作。

(收稿日期:2022-07-12)