

# 无源负荷侧无功功率快速供给的 VSC-MTDC 系统 故障穿越协调控制

王晓兰,赵巧玲

(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院,甘肃 兰州 730050)

**摘要:**考虑到无源负荷对电压变化敏感,同时交流故障期间直流电压会出现大幅波动,研究了向无源负荷供电的基于电压源型换流器的多端直流输电(VSC-MTDC)系统交流故障穿越策略,提出了一种故障穿越协调控制方法:受端站在满足无功优先的原则下,依据交流电压跌落情况直接计算电流指令,仅采用电流内环控制实现对无源负荷侧无功功率的快速供给,为负荷侧交流电压的恢复提供无功支持;为与受端站协调,连接电网的送端站也切换至快速电流控制,故障电流指令值由直流电压变化大小和方向直接计算得到,并满足多端 VSC-MTDC 系统的  $I-V$  下垂特性,以优先保证 VSC-MTDC 系统的有功需求,快速实现系统功率平衡,减小故障期间直流电压的波动幅度。在 MATLAB/Simulink 中搭建了向无源负荷供电的三端 VSC-MTDC 系统模型,仿真结果表明所提协调控制策略能够提高无源负荷的故障穿越能力,实现 VSC-MTDC 系统的稳定运行。

**关键词:**基于电压源型换流器的多端直流输电;无源负荷;电压跌落;故障穿越;协调控制

**中图分类号:**TM 721.1

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.005

## 0 引言

风电场一般远离用电负荷中心,基于电压源型换流器的高压直流输电(VSC-HVDC)系统,也称为柔性直流输电系统,在远距离电能传输方面优势明显,是大规模风电外送的有效途径,也是构建能源互联网的关键技术<sup>[1]</sup>。基于电压源型换流器的多端直流输电(VSC-MTDC)系统有多个送端和受端,能够将大规模风电输送至多个负荷中心,具有传输损耗低、潮流控制灵活、能够连接异步电网且易于控制等优点<sup>[2-3]</sup>。对于大型无源工业负荷,如海上石油钻井平台、孤立小岛等而言,多端 VSC-MTDC 系统是一种经济、可靠的供电方式<sup>[4]</sup>,具有广阔的应用前景。

当 VSC-MTDC 系统向大型无源工业负荷供电时,交流故障对系统危害严重。通过控制策略,提高 VSC-MTDC 系统的故障穿越能力,对保障系统安全运行具有重要意义。文献[5]研究了 VSC-HVDC 系统向无源负荷供电时的故障穿越策略,改进了电流限幅环节,同时增加了频率滞环控制,实现了无源负荷侧电压的稳定控制,但是引起了频率波动。文献[6]对连接风电场的 VSC-HVDC 系统的故障策略进行了研究,提出了基于风电机组惯性支持的故障穿越方法,减小故障期间风电场输出功率,避免直流电压的大幅上升。文献[7]通过在 PSCAD/EMTDC 中

搭建仿真模型,验证了 3 种频率控制器在提升 VSC-HVDC 系统故障穿越能力中的效果。文献[8]针对动态卸荷电阻的故障穿越方式,分析了卸荷电阻的参数设计。文献[9]通过减小风电场输出功率和卸荷电路相结合的方式实现了 VSC-HVDC 系统并网的风电场故障穿越。文献[10]通过升频/降压法减小风电场输出功率,并与直流卸荷电路相配合,实现了 VSC-MTDC 系统并网的风电场故障穿越。文献[11]提出了适合 VSC-MTDC 系统的交直流潮流算法。文献[12]对 VSC-MTDC 系统下垂控制  $P-V$  特性曲线进行了时域分析,提出了  $P-V$  特性曲线集合。文献[13]研究了基于下垂控制的 VSC-MTDC 系统直流功率参考值的修正方法。文献[14]提出的下垂控制策略考虑了输电损耗和新能源波动的影响,提高了系统电压质量。

上述文献所提升频/降压以及采用卸荷电路的故障穿越方法,分别从减小风电场输出功率、通过卸荷电路消耗盈余功率角度出发,实现故障期间系统功率平衡,因此仅适用于故障发生在受端站且受端站连接到交流电网的情况。若故障发生在连接电网的送端站,或者受端站连接无源工业负荷时,上述故障穿越策略并不适用。为了弥补这一不足,本文研究了连接风电场、交流电网、无源负荷的三端 VSC-MTDC 系统中,无源负荷侧交流故障情形下和交流电网侧故障情形下系统的响应特性,提出了一种交流故障穿越协调控制策略:当检测到交流故障后,向无源负荷供电的受端站,以无功优先为原则,依据电压跌落情况直接计算电流指令,实现对无源负荷侧无功功率的快速供给;连接电网的送端站以优先保

收稿日期:2017-09-15;修回日期:2018-08-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50967001);甘肃省自然科学基金资助项目(1107RJZA272)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50967001) and the Natural Science Foundation of Gansu Province(1107RJZA272)

证 VSC-MTDC 系统的有功需求为原则,电流指令按照 VSC-MTDC 系统的  $I-V$  下垂特性计算,通过 VSC-MTDC 系统各换流站的协调控制实现系统交流故障穿越。

## 1 系统结构及控制

### 1.1 系统结构

图 1 为三端 VSC-MTDC 系统结构示意图,其包含 2 个送端站和 1 个连接无源工业负荷的受端站。

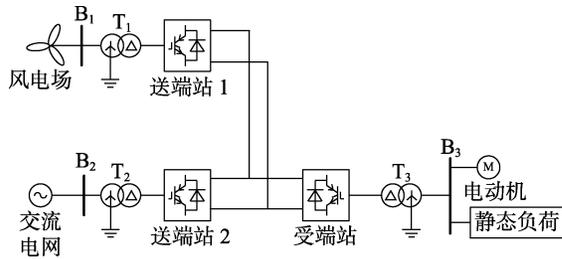


图 1 三端 VSC-MTDC 系统结构图

Fig.1 Structure diagram of three-terminal VSC-MTDC system

### 1.2 换流器数学模型

换流器单接线图如图 2 所示。图中,  $u_s$  为公共耦合点(PCC)的电压;  $u_c$  为换流器交流侧电压;  $i_s$  为流过换流器的电流;  $R$  和  $L$  分别为 PCC 和换流器间的等效电阻和电感;  $C$  为直流侧电容;  $U_{dc}$  为直流电压。

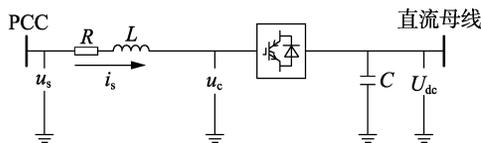


图 2 VSC 单接线图

Fig.2 Single-line diagram of VSC

换流器在  $dq$  旋转坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} L \frac{di_{sd}}{dt} = -Ri_{sd} + \omega Li_{sq} + u_{sd} - u_{cd} \\ L \frac{di_{sq}}{dt} = -Ri_{sq} - \omega Li_{sd} + u_{sq} - u_{cq} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  分别为  $u_s$  的  $d$ 、 $q$  轴分量,其他物理量同理。

### 1.3 换流站控制

VSC-MTDC 系统稳定运行时各换流站均采用传统控制策略,即内外双闭环控制,如图 3 所示。图中  $H^*$  和  $L^*$  分别为  $d$  轴外环控制指令和  $q$  轴外环控制指令。VSC-MTDC 系统中的各换流站因控制目标不同,外环控制指令也不相同。对于图 1 所示的三端 VSC-MTDC 系统而言,连接风电场的送端站 1,按照风电场最大功率跟踪点曲线输出功率,所以送端站 1 的  $d$  轴和  $q$  轴外环控制指令分别为  $P^*$ 、 $Q^*$ ;连接交流大电网的送端站 2 主要负责维持系统直流电压的

稳定,故送端站 2 的  $d$  轴和  $q$  轴外环控制指令分别为  $U_{dc}^*$ 、 $Q^*$ ;连接无源负荷的受端站,需向负荷提供稳定的交流电压,因此受端站  $d$  轴和  $q$  轴外环控制指令分别为负荷侧参考交流电压  $u_s^*$  的  $d$ 、 $q$  轴分量  $u_{sd}^*$ 、 $u_{sq}^*$ 。

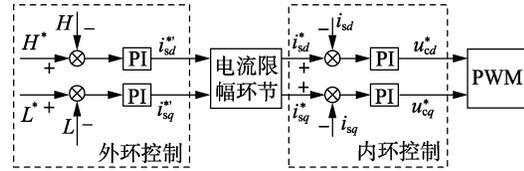


图 3 VSC 双闭环控制示意图

Fig.3 Schematic diagram of dual closed-loop control for VSC

## 2 交流故障穿越协调控制

### 2.1 交流故障特性分析

在图 2 所示的换流器单接线图中,直流侧电容  $C$  所在回路的时间常数为  $\tau_c$ ,其计算公式为:

$$\tau_c = \frac{CU_{dcN}^2}{S_N} \quad (2)$$

其中,  $U_{dcN}$  为额定直流母线电压;  $S_N$  为换流器额定容量。式(2)的物理意义是以额定直流电流  $I_{dcN}$  对直流侧电容  $C$  充电,电容电压从 0 上升至  $U_{dcN}$  所需的时间。

当送端交流系统在母线 PCC 处发生故障时,其输入直流输电网的功率急剧下降,受端站输出到无源负荷的功率瞬时保持不变,直流侧电容开始向无源负荷侧放电,以试图维持直流输电网功率平衡,电容放电后直流电压下降。为保护换流器,控制器一般都有电流限幅环节,直流电压的持续下降会导致电流达到限幅值,外环直流电压控制失去控制作用,直流电压将会出现大幅的波动。无源侧 VSC 输出交流电压有效值  $U_c$  为:

$$U_c = \frac{\sqrt{3}MU_{dc}}{2\sqrt{2}} \quad (3)$$

其中,  $M$  为调制度。由式(3)可知,无源侧 VSC 输出交流电压有效值  $U_c$  与直流电压  $U_{dc}$  有关,因此直流电压的波动会造成无源负荷侧交流电压变化。

当受端 VSC 端口处发生故障时,无源负荷从直流侧吸收的功率急剧下降,无源负荷侧交流电压出现大幅跌落。送端站输入到直流网的功率瞬时不变,直流侧电容被充电,吸收直流网的盈余功率,直流电压上升。直流电压的大幅上升导致送端站外环直流电压环节失去控制作用,直流电压将出现大幅波动。

若图 1 所示的系统发生三相接地故障,无论故障发生在送端站还是受端站交流母线处,无源负荷侧交流电压都会跌落。假设无源网络交流母线电压

由额定幅值  $U_{sN}$  跌落至  $U_{sdrop}$ ,  $d$  轴电流分量由  $i_{sdN}$  上升至  $i_{sdlim}$ , 根据瞬时功率理论<sup>[15]</sup>, 故障前、后受端站 VSC 从直流网吸收的有功功率分别为  $P_N = 3U_{sN}i_{sdN} \div 2$ 、 $P_{drop} = 3U_{sdrop}i_{sdlim} \div 2$ , 故障期间直流网传输的不平衡功率  $\Delta P = P_N - P_{drop}$ 。若直流输电系统稳定运行的最低允许直流电压和最高允许直流电压分别为  $U_{dcl}$ 、 $U_{dech}$ , 送端故障导致直流电压降至  $U_{dcl}$  的时间为  $\tau_{lim,l}$ , 受端故障导致直流电压升至  $U_{dech}$  的时间为  $\tau_{lim,h}$ , 忽略线路换流器和直流输电网络的损耗, 理论上:

$$\Delta P_{\tau_{lim,l}} = \frac{1}{2}C(U_{dcN}^2 - U_{dcl}^2) \quad (4)$$

$$\Delta P_{\tau_{lim,h}} = \frac{1}{2}C(U_{dech}^2 - U_{dcN}^2) \quad (5)$$

通过式(4)、(5)可知, VSC-MTDC 系统发生交流故障时, 需通过改进换流器控制策略, 使系统在  $\tau_{lim,l}$  或  $\tau_{lim,h}$  内做出响应, 可避免系统直流电压和无源负荷侧交流电压越限。为此, 本文分别改进了受端站和送端站 2 的控制策略。

## 2.2 受端站故障穿越控制策略

无源负荷对交流电压变化敏感, 为提高无源负荷侧交流电压质量, 稳态运行时向无源网供电的受端站采用电压电流双环控制, 电压外环满足:

$$i_{sd}^* = \left( k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} \right) (u_{sd}^* - u_{sd}) \quad (6)$$

$$i_{sq}^* = \left( k_{p2} + \frac{k_{i2}}{s} \right) (u_{sq}^* - u_{sq}) \quad (7)$$

其中,  $i_{sd}^*$ 、 $i_{sq}^*$  分别为外环控制器输出的  $d$ 、 $q$  轴电流指令值;  $k_{p1}$ 、 $k_{i1}$  和  $k_{p2}$ 、 $k_{i2}$  分别为  $d$  轴和  $q$  轴控制环的比例-积分 (PI) 参数。

外环控制器  $d$ 、 $q$  轴交流电压参考值如下:

$$\begin{cases} u_{sd}^* = U_{sN} \\ u_{sq}^* = 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $U_{sN}$  为无源网络 PCC 交流电压的额定值。

由交流故障特性分析可知, 故障时无源负荷侧交流电压会出现大幅的波动。文献[5]详细分析了交流故障时, 受端站输入到无源网络的有功、无功功率对交流电压的影响, 并得出无功功率是影响无源负荷侧交流电压的主要因素。故障穿越的关键是实现无源负荷侧无功功率的快速供给<sup>[5,10]</sup>, 为此本文改进了受端站控制策略。交流故障时, 控制器根据故障指令信号  $s$ , 由传统控制策略的内外双环切换至电流单环, 采用直接电流控制, 以提高故障响应速度, 实现无功功率的快速供给, 支持受端站交流电压恢复。故障指令信号计算环节如图 4 所示。

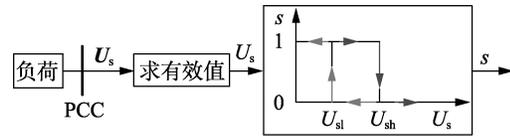


图 4 故障指令信号计算环节

Fig.4 Calculation link of fault command signal

为了避免控制过程中单、双环的频繁切换, 采用了电压滞环判断环节。具体控制过程如下: 交流故障发生后, 电压跌落, 当电压有效值  $U_s$  低于故障启动电压  $U_{sl}$  时, 设置故障指令信号  $s = 1$ , 电流指令由故障电流指令计算环节直接得到; 交流电压恢复正常后, 当电压有效值  $U_s$  高于故障恢复电压  $U_{sh}$  时, 设置故障指令信号  $s = 0$ , 电流指令由外环交流电压环节控制, 系统恢复稳态运行。在考虑系统稳态特性和暂态特性的基础上, 设置电压滞环判断环节中的故障启动电压  $U_{sl} = 0.85$  p.u. 和故障恢复电压  $U_{sh} = 0.95$  p.u.<sup>[5]</sup>。

故障电流指令值的计算以优先提供无功电流为原则, 并且交流电压  $u_s$  跌落幅度越大, 需提供的无功功率越大, 无功电流指令  $i_{sq}^*$  也越大, 反之亦然。因此得到故障电流指令的计算公式为:

$$\begin{cases} i_{sq}^* = i_{sq0}^* + \alpha \Delta u_s I_{lim} \\ i_{sd}^* = \sqrt{I_{lim}^2 - (i_{sq}^*)^2} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $\Delta u_s = U_{sN} - u_s$ ;  $I_{lim}$  为无源负荷侧 VSC 电流限幅值;  $i_{sq0}^*$  为稳态无功电流指令值;  $\alpha$  为正的调节系数。

## 2.3 送端站 2 故障穿越控制策略

由 2.1 节故障特性分析可知, 交流故障时, 连接电网的送端站 2 由外环电压环节得到的电流指令值达到电流限幅值, 外环失去直流电压控制作用, 若不采取控制措施将导致直流电压的大幅波动。为此, 本文改进了送端站 2 的控制策略, 根据图 4 中的交流故障指令信号  $s$ , 若  $s = 1$ , 送端站 2 切换至直接电流控制, 以提高故障响应速度。

连接电网的送端站 2 容量大, 有很好的有功功率协调能力, 当系统功率发生大的扰动时, 需要送端站 2 能够快速做出响应, 增加/减小输入到直流网的有功功率, 以尽快实现 VSC-MTDC 系统功率平衡, 保障直流电压的稳定。因此, 送端站 2 内环电流指令值的给定以优先满足有功电流为原则。下面具体分析故障时直流网的功率变化情况, 当直流输电网输入功率大于输出功率时, 直流电压上升, 电压偏差  $\Delta U_{dc} = U_{dc}^* - U_{dc} < 0$ , 送端站 2 需减小输入到直流网的有功, 也即减小有功电流指令值  $i_{sd}^*$ , 且  $|\Delta U_{dc}|$  越大, 需减小的有功输出越大,  $i_{sd}^*$  越小; 当直流输电网输入功率小于输出功率时, 直流电压下降, 电压偏差  $\Delta U_{dc} = U_{dc}^* - U_{dc} > 0$ , 送端站 2 需要增加输入到直流网的有功, 也即增加有功电流指令值  $i_{sd}^*$ , 且  $|\Delta U_{dc}|$  越

大,需增加的有功输出越大, $i_{sd}^*$  越大。通过分析可知,故障期间,送端站 2 有功电流指令值与直流电压的关系满足  $I-V$  下垂特性规律。VSC-MTDC 系统中  $I-V$  (或  $P-V$ ) 下垂特性在文献 [11-14] 中有详细研究,这里不再赘述。因此故障期间有功电流指令为:

$$i_{sd}^* = i_{sd0}^* + \beta \Delta U_{dc} \quad (10)$$

其中,  $\Delta U_{dc} = U_{dc}^* - U_{dc}$ ;  $\beta$  为正的调节系数;  $i_{sd0}^*$  为稳态电流指令值。

若  $t_1$  时刻交流故障指令信号  $s=1$ , 送端站 2 由双环控制切换至单环控制,  $d$  轴电流指令值  $i_{sd}^*$  由稳态电流值  $i_{sd0}^*$  跃变为  $i_{sd1}^*$ ;  $t_2$  时刻交流故障指令信号  $s=0$ , 送端站 2 由单环控制恢复至双环控制,  $d$  轴电流指令值由  $i_{sd1}^*$  跃变为  $i_{sd2}^*$ , 如图 5(a) 所示。这种跃变对系统稳定性很不利, 为了解决这一问题, 在控制器中增加惯性环节, 以实现单双环切换过程中电流指令的平滑切换, 如图 5(b) 所示。

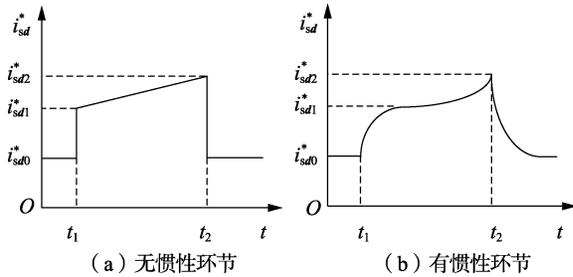


图 5 电流指令变化示意图

Fig.5 Schematic diagram of current command variation

## 2.4 VSC 的电流限幅环节

发生交流故障时,为使所提故障穿越协调控制策略更好地发挥作用,各换流站的电流限幅环节需要根据系统运行需求进行改进。对于向无源负荷供电的受端站而言,故障期间的首要任务是保证交流电压的快速恢复,为此必须保障无功电流的优先供应;对于连接电网的送端站 2 而言,其控制的首要任务是保证对直流输电网对有功功率变化的响应,为此优先提供有功电流;连接风电场的送端站 1 采取有功无功同等优先级限幅控制。不同情况下,  $d$ 、 $q$  轴电流限幅值  $I_{dlim}$ 、 $I_{qlim}$  计算公式见式(11)~(13)。

无功电流优先时有:

$$\begin{cases} I_{qlim} = I_{lim} \\ I_{dlim} = \sqrt{I_{lim}^2 - (i_{sq}^*)^2} \end{cases} \quad (11)$$

有功电流优先时有:

$$\begin{cases} I_{dlim} = I_{lim} \\ I_{qlim} = \sqrt{I_{lim}^2 - (i_{sd}^*)^2} \end{cases} \quad (12)$$

有功、无功电流同等优先级时有:

$$I_{dlim} = I_{qlim} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{lim} \quad (13)$$

## 3 仿真分析

为了验证本文所提交流故障穿越协调控制的有效性,基于 MATLAB/Simulink 搭建了如图 1 所示的三端 VSC-HVDC 系统,其中风电场采用等值模型,额定容量为 45.05 MW;无源网络由等值感应电动机和恒阻抗的静态负荷组成。仿真采用的系统参数如下:直流母线电压为  $\pm 100$  kV, VSC 额定交流电压为 110 kV,基准容量为  $100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,送端站 1 额定容量为  $50 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,送端站 2 额定容量为  $200 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,受端站额定容量为  $250 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,额定频率为 50 Hz, VSC 调制波频率为 1 350 Hz,直流电容  $C=1.8 \text{ mF}$ ,等效电感  $L=50 \text{ mH}$ ,等效电阻  $R=0.15 \Omega$ 。等值感应电动机参数如下:励磁电抗为 2.62 p.u.,定子阻抗为  $0.0022 + j0.0759 \text{ p.u.}$ ,转子阻抗为  $0.0288 + j0.1037 \text{ p.u.}$ ,匝数比为 2.15%,惯性时间常数为 0.66 s,额定容量为  $110 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,额定电压为 10 kV。静态负荷参数如下:额定容量为  $80 + j20 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,额定电压为 63.5 kV。

下面分别针对无源负荷侧故障和交流电网侧故障的情形,比较分析在传统控制策略和本文所提故障穿越协调控制策略下系统的响应特性。为了便于比较,结果均以标么值形式表示。

### 3.1 无源负荷侧交流故障情形

#### 3.1.1 三相故障情形

仿真开始时,三端 VSC-MTDC 系统稳定运行, 1.5 s 时,连接无源负荷的受端站端口处发生三相接地故障,故障持续 0.1 s 后清除,系统响应特性曲线如图 6 所示。图 6(a) 为 2 种控制策略下负荷侧交流电压波形,可以看出在所提故障穿越策略下无源负荷侧交流电压能够在 0.52 s 后恢复至稳态值;而采用传统控制策略时,无源负荷侧电压下降至 0.67 p.u. 左右,无法恢复到限值范围以内。图 6(b) 为直流电压波形,可以看出所提故障穿越策略能够有效减小暂态过程中直流电压的波动幅度。图 6(c) 为故障指令信号, 1.52 s 左右时,无源负荷侧交流电压小于故障启动电压  $U_{sl}$  (0.85 p.u.), 故障指令信号由 0 跃变为 1,送端站 2 和受端站控制器均由正常控制状态切换至快速电流控制状态,在故障电流指令计算环节和改进电流限幅环节的作用下,增加送端站 2 输入到直流网的有功功率,如图 6(d) 中虚线所示,同时增加受端站输入到无源网络的无功功率,如图 6(e) 中的虚线所示。1.97 s 左右时,无源负荷侧交流电压大于故障恢复电压  $U_{sh}$  (0.95 p.u.), 故障指令信号由 1 恢复至 0,送端站 2 和受端站控制器均恢复至正常控制状态。

比较图 6(a) 和 6(b) 可以看出,在传统控制策略下,直流电压能够恢复至 1 p.u.,但是负荷侧交流电压无法恢复至 1 p.u.。这是因为直流侧电容通过充放电过程,能够为直流侧电压的恢复提供部分有

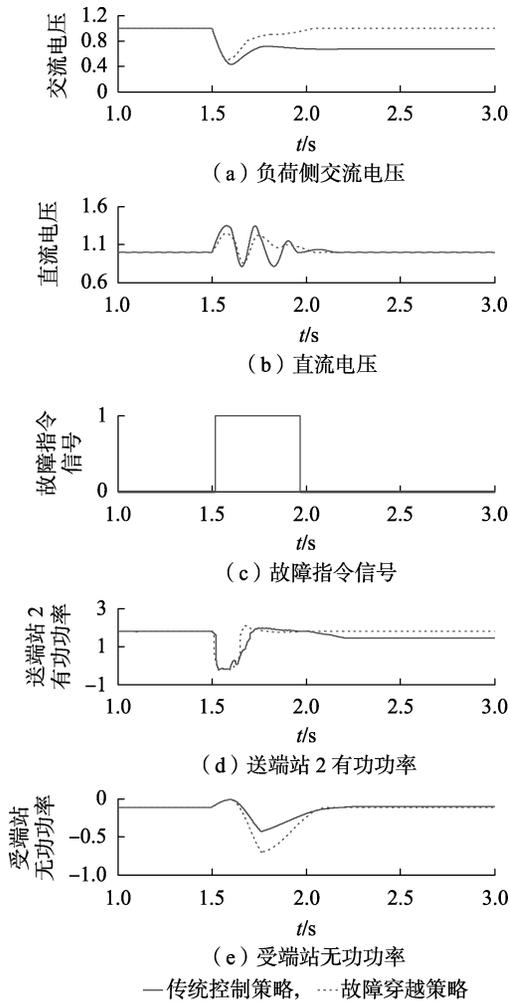


图 6 受端三相故障下系统响应

Fig.6 System responses under three-phase fault at receiving side

功支持。无源负荷的交流电压能够恢复的关键在于充足的无功供给。发生三相短路时,负荷侧电压跌落最为严重,无功供给严重不足,受端站由于电流限幅环节的作用无法及时向负荷侧提供充足的无功,负荷侧又无其他无功功率支持,故导致交流电压不能恢复至 1 p.u.。

### 3.1.2 单相故障情形

当三端 VSC-MTDC 系统稳定运行至 1.5 s 时,连接无源负荷的受端站端口处发生单相接地故障,故障持续 0.1 s 后清除,系统响应特性曲线如图 7 所示。对比图 7(a)、7(b)中所示的 2 种控制策略下的响应曲线可以看出,本文所提的故障穿越策略能够使无源负荷侧交流电压快速恢复,改善故障期间的直流电压特性。1.53 s 左右时,无源负荷侧交流电压低于 0.85 p.u.,故障指令信号由 0 跃变为 1,控制器切换至快速电流控制模式;1.95 s 左右时,无源负荷侧交流电压恢复至 0.95 p.u.,故障指令信号由 1 恢复至 0,控制器恢复双环控制模式。

比较图 6(a)和 7(a)可以看出,交流电压在三相故障时比单相故障时跌落严重,电压恢复所需的

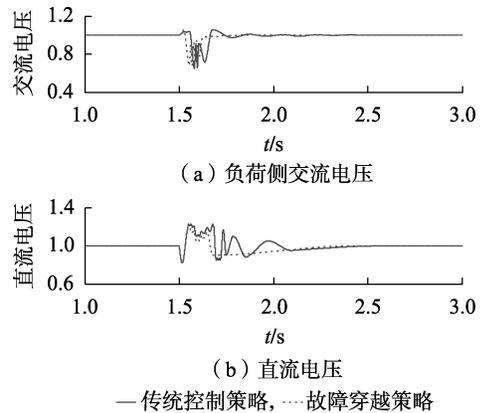


图 7 受端单相故障下系统响应

Fig.7 System responses under single-phase fault at receiving side

无功也更多。采用传统控制策略,若发生单相故障,交流电压能恢复到 1 p.u.;若发生三相故障,交流电压不能恢复到 1 p.u.。

## 3.2 电网侧交流故障情形

### 3.2.1 三相故障情形

仿真开始时,三端 VSC-MTDC 系统稳定运行,1.5 s 时,连接电网的送端站 2 端口处发生三相接地故障,故障持续 0.1 s 后清除,系统响应特性曲线如图 8 所示。图 8(a)为 2 种控制策略下负荷侧交流电压波形,可以看出在所提故障穿越策略下无源负荷侧交流电压能够在 0.5 s 后恢复至稳态值;而采用传统控制策略时,无源负荷侧电压下降至 0.68 p.u.左右,无法恢复到限值范围以内。图 8(b)为直流电压波形,可以看出所提故障穿越策略能够有效减小暂态过程中直流电压的波动幅度。图 8(c)为故障指令信号,1.51 s 左右时,无源负荷侧交流电压小于故障启动电压  $U_{sl}$  (0.85 p.u.),故障指令信号由 0 跃变为 1,送端站 2 和受端站控制器均由正常控制状态切换至快速电流控制状态,在故障电流指令计算环节和改进电流限幅环节的作用下,增加送端站 2 输入到直流网的有功功率,如图 8(d)中虚线所示,同时增加受端站输入到无源网络的无功功率,如图 8(e)中的虚线所示。1.81 s 左右时,无源负荷侧交流电压大于故障恢复电压  $U_{sh}$  (0.95 p.u.),故障指令信号由 1 恢复至 0,送端站 2 和受端站控制器均恢复至正常控制状态。

### 3.2.2 单相故障情形

当三端 VSC-MTDC 系统稳定运行至 1.5 s 时,连接电网的送端站 2 端口处发生单相接地故障,故障持续 0.1 s 后清除,系统响应特性曲线如图 9 所示。对比图 9(a)、9(b)中所示的 2 种控制策略下的响应曲线可以看出,本文所提的故障穿越控制能够使无源负荷侧交流电压快速恢复,改善故障期间的直流电压特性。1.52 s 左右时,无源负荷侧交流电压低于 0.85 p.u.,故障指令信号由 0 跃变为 1,控制器切

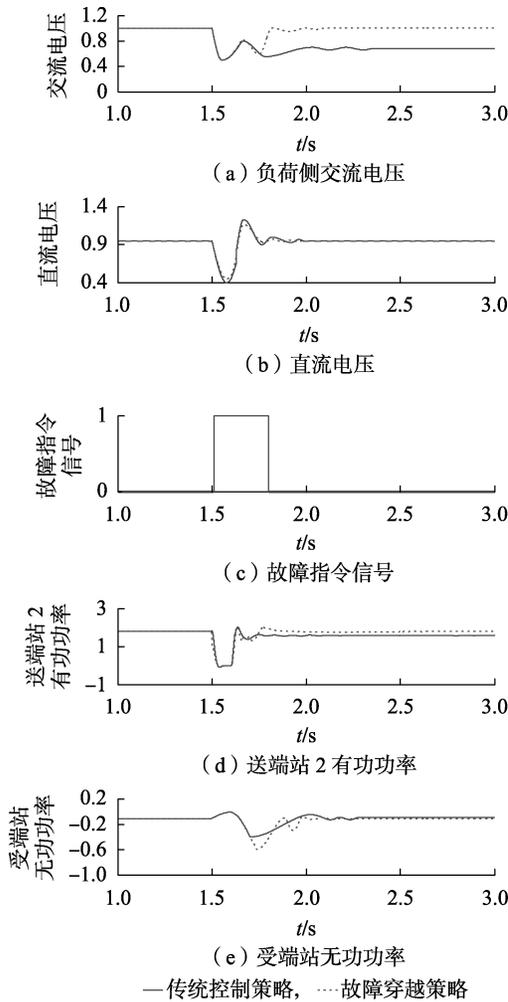


图 8 送端三相故障下系统响应

Fig.8 System responses under three-phase fault at sending side 换至快速电流控制模式;1.98 s 左右时,无源负荷侧交流电压恢复至 0.95 p.u.,故障指令信号由 1 恢复至 0,控制器恢复双环控制模式。

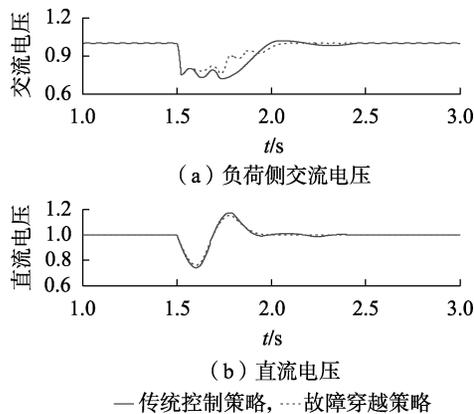


图 9 送端单相故障下系统响应

Fig.9 System responses under single-phase fault at sending side

#### 4 结论

针对风电场和交流电网经 VSC-MTDC 向无源工业负荷供电的系统,在分析系统交流故障特性的基

础上,提出了一种无源负荷侧无功功率快速供给的故障穿越协调控制策略。通过理论分析和仿真研究,得到如下结论。

a. 当送端或是受端发生三相故障时,在传统的 VSC 控制策略下,受端交流电压跌落严重并且无法恢复至稳态值;而在本文所提故障穿越策略下,受端交流电压能够较快速地恢复至稳态值。同时,该控制策略减小了 VSC-MTDC 系统直流电压暂态波动幅度。

b. 当送端或是受端发生单相故障时,与传统的 VSC 控制策略相比,本文所提故障穿越策略加快了换流站故障响应速度,受端交流电压能够在较短时间内恢复至稳态值,减小了系统直流电压波动幅度。

综上所述,本文所提无源负荷侧无功功率快速供给的故障穿越协调控制能够加快系统故障时系统的响应速度,减小直流电压波动幅度,提高无源负荷在故障下的电压稳定性。

#### 参考文献:

[ 1 ] 徐成,梁睿,程真何,等. 面向能源互联网的智能配电网安全态势[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):13-18.  
XU Cheng,LIANG Rui,CHENG Zhenhe,et al. Security situation awareness of smart distribution grid for future energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):13-18.

[ 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.  
TANG Guangfu,HE Zhiyuan,TENG Letian,et al. New progress on HVDC technology based on voltage source converter[J]. Power System Technology,2008,32(22):39-44.

[ 3 ] 汤广福,刘泽洪. 2010 年国际大电网会议系列报道高压直流输电和电力电子技术[J]. 电力系统自动化,2011,35(5):1-4.  
TANG Guangfu,LIU Zehong. A review of CIGRE 2010 on HVDC transmission and power electronic technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(5):1-4.

[ 4 ] 马为民,吴方劫,杨一鸣,等. 柔性直流输电技术及应用前景分析[J]. 高电压技术,2014,40(8):2429-2439.  
MA Weiming,WU Fangjie,YANG Yiming,et al. Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering,2014,40(8):2429-2439.

[ 5 ] 卞志鹏,徐政,宣羿. 提升无源工业负荷故障穿越能力的 VSC-HVDC 控制策略[J]. 电力系统自动化,2016,40(7):61-67.  
BIAN Zhipeng,XU Zheng,XUAN Yi. Enhanced fault ride-through method for VSC-HVDC supply of passive industrial installations[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(7):61-67.

[ 6 ] 王毅,付媛,苏小晴,等. 基于 VSC-HVDC 联网的风电场故障穿越控制策略研究[J]. 电工技术学报,2013,28(12):150-159.  
WANG Yi,FU Yuan,SU Xiaoqing,et al. Fault ride-through control strategy of wind farm integrated with VSC-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(12):150-159.

[ 7 ] DU C,AGNEHOLM E,OLSSON G. Comparison of different frequency controllers for a VSC-HVDC supplied system[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2008,23(4):2224-2232.

[ 8 ] 程明,杜海超. VSC-HVDC 故障穿越控制策略的仿真模型的研究[J]. 电气开关,2016,54(4):27-33.  
CHENG Ming,DU Haichao. Study on the simulated model of VSC-

- HVDC fault through control strategy[J]. Electric Switchgear, 2016, 54(4):27-33.
- [9] 韩笑,王毅,张志恒. 基于 VSC-HVDC 联网的风电场故障穿越能力研究[J]. 电力科学与工程, 2014, 30(1):26-31.  
HAN Xiao, WANG Yi, ZHANG Zhiheng. Fault ride through strategy for wind farms connected to grid via VSC-HVDC [J]. Electric Power Science and Engineering, 2014, 30(1):26-31.
- [10] 戴金水,朱森. VSC-MTDC 联网风电场的交流故障穿越控制[J]. 电气自动化, 2016, 38(1):26-30.  
DAI Jinshui, ZHU Miao. A control strategy for AC fault ride-through of wind farm integration through VSC-MTDC [J]. Electrical Automation, 2016, 38(1):26-30.
- [11] 陈谦,唐国庆,王浔. 多端 VSC-MTDC 系统交直流潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(6):1-6.  
CHEN Qian, TANG Guoqing, WANG Xun. AC-DC power flow algorithm for multi-terminal VSC-HVDC systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(6):1-6.
- [12] 罗永捷,李耀华,王平,等. 多端柔性直流输电系统下垂控制  $P-V$  特性曲线时域分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1):408-415.  
LUO Yongjie, LI Yaohua, WANG Ping, et al. Time-domain analysis of  $P-V$  characteristic for droop control strategy of VSC-MTDC transmission system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(Supplement 1):408-415.
- [13] 喻锋,王西田,解大,等. 多端柔性直流下垂控制的功率参考值修正方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11):117-122.  
YU Feng, WANG Xitian, XIE Da, et al. Power reference correction method for droop control of VSC-MTDC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11):117-122.
- [14] 李文勋,车延博,洪潮,等. 考虑输电损耗和新能源波动的 VSC-MTDC 下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8):220-226.  
LI Wenxun, CHE Yanbo, HONG Chao, et al. VSC-MTDC droop control strategy considering transmission loss and renewable energy fluctuation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):220-226.
- [15] 徐政,屠卿瑞,管敏渊,等. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2012:1-45.

#### 作者简介:



王晓兰

王晓兰(1963—),女,甘肃秦安人,教授,博士研究生导师,主要从事风力发电及其控制技术、微电网控制等方面的研究(E-mail:wangzt@lut.cn);

赵巧玲(1988—),女,甘肃平凉人,硕士研究生,主要从事柔性直流输电技术方面的研究(E-mail:3087221736@qq.com)。

## Coordinated control for fault ride-through in VSC-MTDC system with quickly supply of reactive power to passive load

WANG Xiaolan, ZHAO Qiaoling

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Considering the facts that passive loads are sensitive to voltage drops and AC contingencies can result in large fluctuation in DC voltages, a coordinated control strategy of VSC-MTDC (Voltage Source Converter based Multi-Terminal Direct Current) system for AC fault ride-through is proposed. The passive stations directly calculate the current command values according to the AC voltage drop, in which priority is given to the reactive power. Only the current inner-loop control is implemented to provide rapid reactive power support on the passive load side, and consequently the AC voltage recovery at the demand side is ensured. In coordination, the controller at the grid side is also switched to rapid current control. The current demand values are directly calculated based on the variation in the value and direction of DC voltages, where  $I-V$  droop characteristics of multi-terminal VSC-HVDC system are satisfied, so as to guarantee the active power demand of VSC-MTDC system, balance the system power quickly and decrease the DC voltage variation during the fault period. A three-terminal VSC-MTDC system is established on the MATLAB/Simulink platform. Simulative results demonstrate that the proposed coordinated control strategy can effectively improve the AC fault ride-through ability and ensure the stable operation of VSC-MTDC system.

**Key words:** VSC-MTDC; passive load; voltage drop; fault ride-through; coordinated control