

[直流输电系统]

向无源负荷供电的VSC-MTDC故障穿越研究

文/赵巧玲¹ 张建明² 杨军平¹

1. 兰州资源环境职业技术大学; 2. 兰州倚能电力设计咨询有限公司

多端柔性直流输电系统（VSC-MTDC）有多个送端和受端，能够降低线路损耗、便于控制潮流，在风电远距离外送、向无源负荷供电等领域有着明显技术优势。对连接电网、无源负荷和风电场的三端VSC-MTDC系统故障穿越进行研究。发生故障时，向无源负荷供电的受端站优先快速供给无功功率，帮助负荷侧交流电压的恢复；连接电网的送端站优先快速供给有功功率，帮助系统尽快实现功率平衡，保障系统直流电压质量。为了验证控制效果，在MATLAB/Simulink中建立仿真模型，结果表明所提控制策略减小故障对交流电压的影响，加快系统故障响应速度。

多端柔性直流输电系统（Voltage Source Converter Multi-Terminal DC System, VSC-MTDC）在风电大规模输送过程中具有明显优势，对解决我国西北风电能源向东南沿海输送有很大的实用价值。同时VSC-MTDC输电方式潮流控制灵活，能够实现向大型无源负荷供电，是一种具有很大发展前景的经济可靠的输电方式。对向无源负荷供电的VSC-MTDC来说，一旦发生交流故障会对系统产生巨大的危害。为此，分析VSC-MTDC运行特性，研究控制策略，提高VSC-MTDC故障穿越能力有很大的意义。

VSC-MTDC控制原理

1. 系统结构

本文以图1所示三端VSC-MTDC为例进行分析研究。送端站1连接风电场，送端站2连接电网，受端站实现向无源负荷供电。

2. 换流站数学模型

换流站即图1中的送端站或受端站，其单线连接

如图2所示。图2中PCC指的是公共耦合点（Point of Common Coupling, PCC）。PCC点和换流站间的等效电阻和电感分别用 R 和 L 来表示，直流侧等效电容用 C 来表示。 u_c 为换流站交流侧电压， U_{dc} 为系统直流电压， u_s 为PCC点的电压。

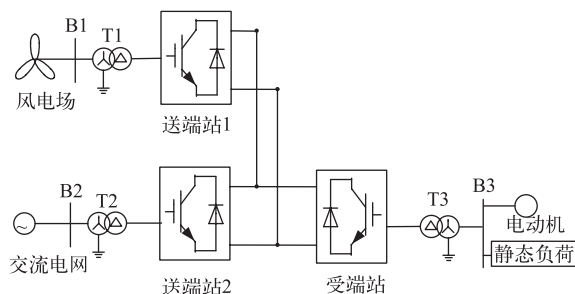


图1 三端VSC-MTDC系统结构图

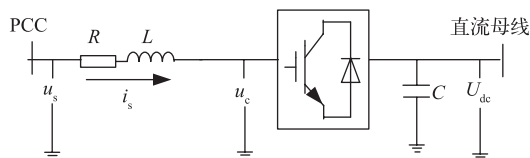


图2 换流站单线连接图

基金项目：2023年度校级科研能力提升项目“基于深度学习的电机拖动装置电流特征的故障诊断研究”（XJ2023002003）

换流站在dq旋转坐标系下的数学模型为

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

式中, u_{sd} 、 u_{sq} 为 u_s 的d、q轴分量, 其他物理量依此类推。

3. 换流站控制

稳态运行时, VSC-MTDC中的各换流站控制策略如图3所示。由图3可知, 稳态运行时换流站采用内外双环控制, H^* 和 L^* 分别代表d轴和q轴外环控制指令, 换流站不同则其控制目标也不同, 故外环控制指令也不相同。

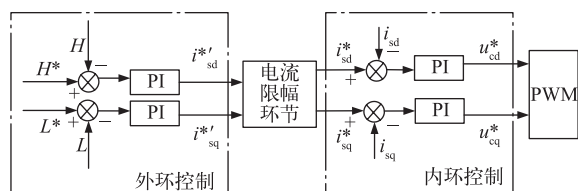


图3 换流站内外双环控制示意图

故障穿越协调控制

1. 交流故障特性分析

图1所示三端VSC-MTDC, 若故障点在送端站母线 u_s 处, 发生故障时输入直流网络的功率急剧下降, 无源负荷吸收的功率瞬时维持不变, 造成直流网络功率欠缺, 直流侧电容C向无源负荷侧开始放电, 直流电压 U_{dc} 急剧下降, 超过换流站双环控制中电流限幅环节的限制, 造成外环控制失去作用, 直流电压因不再受控制而出现大幅波动。

若故障点在受端站母线 u_s 处, 发生故障时输入直流网络的功率瞬时维持不变, 无源负荷吸收的功率急剧下降, 造成直流网络功率盈余, 直流侧电容C被充电, 直流电压急剧 U_{dc} 上升, 同样外环控制失去作用使得直流电压出现大幅波动。

由此看出无论故障发生在送端站还是受端站, 直流电压均会出现不受控制的大幅波动。由于VSC-MTDC系统直流电压 U_{dc} 和换流站交流侧电压有效值 U_c 之间存在如下关系

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

式中, M 为调制度。

交流故障发生后, 不仅使得系统直流电压出现

大幅波动, 也会使无源负荷侧交流电压出现变化。

2. 受端站故障穿越控制

故障发生后, 无源负荷侧交流电压会出现大幅波动。由于无源负荷对电压的变化敏感, 电压出现大幅波动会对无源负荷的运行产生很大危害。为此, 本文改进了连接无源负荷的受端站的控制策略。

在控制过程中, 增加一故障指令信号 s , 其作用是通过检测无源负荷侧交流电压 u_s 的变化, 进而改变受端站的控制模式。发生故障时, 无源负荷侧电压会跌落, 当检测到负荷侧交流电压有效值 U_s 低于故障启动电压 U_{s1} 时, 故障指令信号 $s=1$, 受端站切换至单环控制模式, 仅内环电流控制环节以加快故障响应速度。若检测到交流电压有效值 U_s 高于故障恢复电压 U_{sh} 时, 故障指令信号 $s=0$, 受端站恢复至稳态时的内外双环控制模式。故障指令信号 s 的计算原理如图4所示。

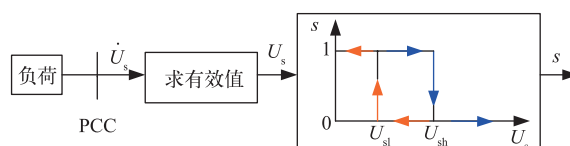


图4 故障指令信号计算环节

内外双环控制模式不再赘述, 下面重点分析单环控制模式。故障发生后, 保障充足的无功功率的供应是无源负荷侧交流电压恢复的关键因素^[1-2]。因此, 单环控制模式时, 内环电流控制环节中的电流指令值的计算遵循优先满足无功电流的原则。具体计算公式为

$$\begin{cases} i_{sq}^* = i_{sq0}^* + \alpha \Delta u_s I_{lim} \\ i_{sd}^* = \sqrt{I_{lim}^2 - i_{sq}^{*2}} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\Delta u_s = U_{sN} - u_s$, 表示的是负荷侧交流电压的跌落情况; U_{sN} 为无源负荷侧交流电压的额定幅值; I_{lim} 表示的是换流站的电流限幅值; i_{sq0}^* 表示的是稳态时的无功电流指令值; $\alpha > 0$ 。

由电流指令计算公式可知, 无源负荷侧交流电压跌落越严重, 无功电流指令值 i_{sq}^* 越大, 以提供更多的无功功率帮助负荷侧交流电压的恢复。

3. 送端站2故障穿越控制

发生故障时, 连接电网的送端站2外环失去控制作用, 直流电压会出现大幅波动。为了实现故障穿越, 保障直流电压, 本文改进了换流站2的控制

策略：若故障指令信号 $s=1$ ，则换流站2切换至单环控制；如果故障指令信号 $s=0$ ，则换流站2恢复双环控制。

送端站2连接电网，容量大，有功协调能力强。VSC-MTDC系统有功功率平衡是保障直流电压的质量的关键^[3-4]。发生故障时，系统功率出现大幅扰动，这就需要送端站2快速改变输送到直流网络的有功功率，尽快恢复系统有功功率平衡。为此，换流站2切换至单环控制模式时，内环电流指令值的计算应满足有功功率优先供应原则，电流指令值的具体计算公式为

$$i_{sd}^* = i_{sd0}^* + \beta \Delta U_{dc} \quad (4)$$

式中， $\Delta U_{dc} = U_{dc}^* - U_{dc}$ ，表示直流电压的波动幅度； $\beta > 0$ ； i_{sd0}^* 表示稳态有功电流指令值。

4. 换流站电流限幅环节

为了实现故障穿越，本文在所提控制策略的基础上改进了各换流站电流限幅环节。

对连接风电场的送端站1，采用无功、有功同等优先级的方式， d 、 q 轴电流限幅值 I_{dlim} 、 I_{qlim} 按照下列公式计算得到

$$I_{dlim} = I_{qlim} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{lim} \quad (5)$$

对连接电网的送端站2，采用有功优先的原则， d 、 q 轴电流限幅值 I_{dlim} 、 I_{qlim} 按照下列公式计算得到

$$\begin{cases} I_{dlim} = I_{lim} \\ I_{qlim} = \sqrt{I_{lim}^2 - i_{sd}^{*2}} \end{cases} \quad (6)$$

对连接无源负荷的受端站，采用无功优先的原则， d 、 q 轴电流限幅值 I_{dlim} 、 I_{qlim} 按照下列公式计算得到

$$\begin{cases} I_{qlim} = I_{lim} \\ I_{dlim} = \sqrt{I_{lim}^2 - i_{sq}^{*2}} \end{cases} \quad (7)$$

仿真研究

在MATLAB/Simulink建立图1所示三端VSC-MTDC系统，系统参数和负荷参数见表1和表2。

1. 受端三相故障情形

系统稳定运行至1.5 s时，受端站出口处发生三相接地故障，故障持续时间为0.1 s。图5为三端VSC-MTDC系统特性曲线。通过对比两种控制策略下的曲线可看出，所提故障穿越策略能够改善无源

负荷侧交流电压特性，减小了故障期间直流电压波动幅度。

表1 系统仿真参数

参数	数值
直流母线电压/kV	± 100
VSC额定交流电压/kV	110
基准容量/(MV·A)	100
送端站1额定容量/(MV·A)	50
送端站2额定容量/(MV·A)	200
受端站额定容量/(MV·A)	250
额定频率/Hz	50
VSC调制波频率/Hz	1350
直流电容C/mF	1.8
等效电感L/mH	50
等效电阻/ Ω	0.15

表2 负荷参数

参数	IM	S_z
励磁电抗 (pu)	2.62	—
定子阻抗 (pu)	$0.0022 + j0.0759$	—
转子阻抗 (pu)	$0.0288 + j0.1037$	—
匝数比 (%)	2.15	—
惯性时间常数/s	0.66	—
额定容量 (MV·A)	110	$80 + j20$
额定电压/kV	10	63.50

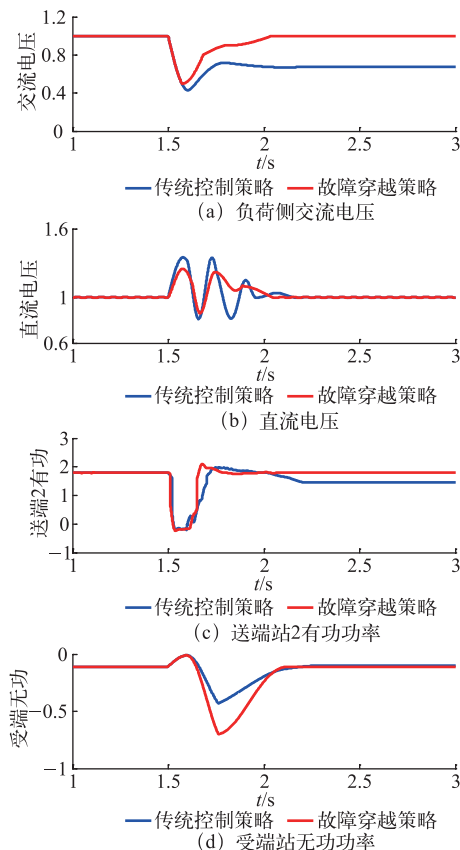


图5 受端三相故障下系统响应

2. 送端三相故障情形

系统稳定运行至1.5 s时，送端站2出口处发生三相接地故障，故障持续时间为0.1 s。图6为三端VSC-MTDC系统特性曲线。通过对比两种控制策略

下的曲线可看出，采用所提故障穿越策略时，负荷侧交流电压能够快速恢复至稳态值，系统直流电压波动幅度明显减小。

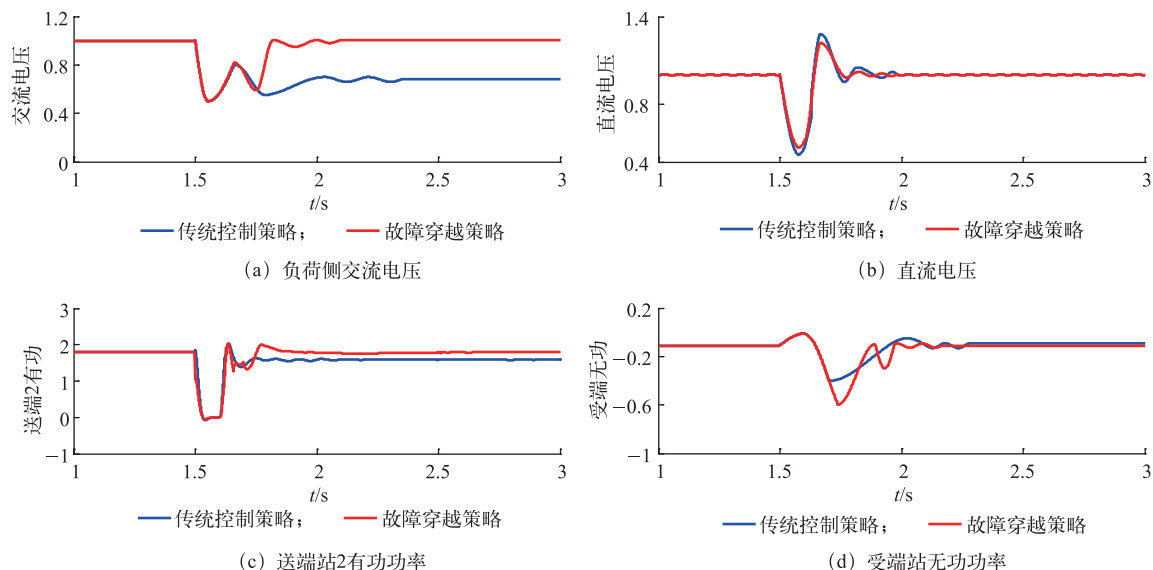


图6 送端三相故障下系统响应

结束语

通过理论分析和仿真研究验证了本文所提故障穿越策略能够帮助负荷侧交流电压快速恢复正常，同时能够改善故障期间直流电压质量，实现系统稳定运行。EA

(收稿日期：2024-09-15)

参考文献

[1] 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.

[2] 戴金水，朱淼. 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.

[3] 董志国，徐全海. 参与电网调频的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 146-155.

[4] 朱介北，史美琦. 基于直流电压补偿的海上风电-多端柔直送出系统惯量协调控制[J/OL]. 电网技术.

