

DOI:10.11784/tdxbz202104023

交直流混联系统协调控制下的故障特征分析

杨炳元¹, 杨志勇¹, 任永峰¹, 杨 帅², 康海珍¹

(1. 内蒙古工业大学电力学院, 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古电力经济技术研究院, 呼和浩特 010090)

摘要: 交直流混联电网场景下交直流线路发生短路会产生新的故障特征。为此, 构建了永磁直驱风电经柔性直流并网的交直流混联系统模型, 系统的协调控制有助于提升其故障穿越能力, 保障其安全稳定运行。故而, 在借助于直流断路器(DCCB)、卸荷电阻以及改进的模块化多电平换流器(MMC)控制策略基础上, 提出一种无需换流站间通信的交直流故障穿越协调控制方案, 进而探讨了不同因素对故障特征的影响。研究表明: 交流并联网络线故障时, MMC 具有非线性、幅值受限和输出电流受控于电压等特征的电源输出特性; 当发生不对称短路故障时, 故障线路柔直侧的负序电流可被完全抑制; 当并网点电压三相有效值跌落到 0.9 p.u.以下时, MMC 优先发出无功功率; 当直流系统不平衡功率积累出现直流过电压现象时, 在主从电压裕度控制策略起主要作用下仅三相短路故障导致直流电压超过 1.05 p.u., 此时风场侧 MMC 凭借降压法及卸荷电阻的投切可使直流电压控制在 1.05~1.10 p.u.范围内。针对直流故障时的低电压问题, 采用就地检测就地保护的故障隔离方案实现了 5~6 ms 切除直流故障。最后, 通过 RTDS 仿真实验验证了该交直流故障穿越方案的有效性, 证实了此控制方案下故障特征与理论分析结论的一致性。

关键词: 交直流混联系统; 模块化多电平换流器; 故障穿越协调控制; 故障特征; RTDS 仿真实验

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2021)12-1258-11

Fault Characteristics Analysis of the AC/DC Hybrid System Under Coordinated Control

Yang Bingyuan¹, Yang Zhiyong¹, Ren Yongfeng¹, Yang Shuai², Kang Haizhen¹

(1. Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Inner Mongolia Electric Power Economic Research Institute, Hohhot 010090, China)

Abstract: The short circuit on the AC/DC line produces new fault characteristics in the AC/DC hybrid grid. For this reason, the AC/DC hybrid system model of direct-driven permanent-magnet wind power was constructed by connecting the flexible DC to the grid. The coordinated control of the system helps to improve the fault ride-through capability and ensures its safe and stable operation. Therefore, a coordinated control scheme of AC/DC fault ride-through without communication between converter stations is presented with the help of a DC circuit breaker (DCCB), dissipation resistance, and an improved modular multilevel converter (MMC) control strategy. The influence of different factors on the fault characteristics is also discussed. The results show that the MMC has the nonlinear and limited amplitude characteristics of power supply output, of which the output current is controlled by the voltage when there is a fault in the AC grid-connected tie. The negative sequence current on the flexible DC side of the fault line can be completely suppressed under the coordinated control strategy when an asymmetric short circuit occurs on the AC grid-connected tie. The MMC prioritizes reactive power when the effective value of the three-phase voltage of the parallel node falls below 0.9 p.u.. The unbalanced power accumulation of the DC system causes the DC overvoltage phenomenon, and the DC voltage exceeds 1.05 p.u. only when the three-phase short circuit occurs under the influence of the control

收稿日期: 2021-04-13; 修回日期: 2021-07-08.

作者简介: 杨炳元(1967—), 男, 学士, 教授.

通信作者: 杨炳元, yangbingyuan@imut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51967016, 51567020); 内蒙古自治区科技重大专项(2019ZD027).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51967016, No. 51567020), the Major Science and Technology Program of Inner Mongolia Autonomous Region (No. 2019ZD027).

strategy of the master and slave voltage margin. The DC voltage can be controlled within the range of 1.05—1.10 p.u. through the step-down method of MMC on the side of the wind farm and the switching of the dissipative resistor. The fault isolation scheme of local detection and local relaying is adopted to remove the fault within 5—6 ms, when the voltage drop is caused by the DC fault. Finally, the effectiveness of the fault ride-through scheme is verified through RTDS, and the fault characteristics under this control scheme are consistent with the theoretical analysis.

Keywords: AC/DC hybrid system; modular multilevel converter; coordinated control of fault ride-through; fault characteristics; RTDS simulation experiment

目前,人们对模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的研究主要集中在拓扑结构、控制和应用等方面^[1].其中半桥式(half bridge, HB)换流器技术得到了商业化应用,但该结构换流器无法隔离直流故障^[2].

文献[3]提到对于柔直交流送出线路发生故障时,换流站呈现电流源特性.由文献[4-5]可知,逆变电源具有有限幅和非线性的输出特性且逆变电源不同的控制策略也影响着其背景下交流线路的故障特性.文献[6]给出了故障期间 MMC 输出电流通用表达式,并分析比对了柔直侧和电网侧电流相位差角的变化规律.本文结合所用控制策略,推导了交流并网联络线故障电流的表达式,分析了影响电流幅值和相位的因素,进而分析电压、功率和阻抗等电气量的故障特征.

柔性直流输电系统具有低阻尼特性,直流线路发生故障时,子模块电容快速放电,故障电流迅速上升,且呈陡增态势,严重影响了系统的安全性和可靠性^[7].文献[8]验证了混合直流断路器(hybrid DC circuit breaker, DCCB)的开断能力,给出了其跳闸后故障特征,并提到了随着控制策略和保护的升级, DCCB 必将在直流电网中扮演不可或缺的角色.本文通过将换流站模型简化为 RLC 等效电路,建立了二阶数学模型^[9-10],对直流电网故障特征进行了理论分析和仿真验证.

文献[11]提到维持直流电压稳定的关键在于确保供电端和受电端的功率平衡.对于交流故障穿越,引起直流输电线路能量累积,可通过优化 MMC 控制策略解决该情况下过电压的问题,如:①通过优化 MMC 电容均压调制策略,实现不对称故障时的换流站间的能量均衡^[12];②为保证逆变站有功功率输出,在交流故障期间不使能环流抑制,降低桥臂电流峰值,增大桥臂电流暂态变化裕度,提高 MMC-HVDC 故障穿越能力^[13];③风场侧 MMC 因具有交流电压控制能力和频率控制能力,可分别通过降低风场侧 d 轴电压参考值^[14]和提高风场侧频率^[15],降低风电输入 MMC-HVDC 的有功功率;④通过有功功率控制

器进行协调控制,自动限制风力发电,避免 MMC-HVDC 线路过载^[16].针对上述问题以及交直流故障穿越引起全功率变换器直流电容电压升高的问题,也可通过安装硬件设备解决,如:文献[17]给出了适用于各种风电运行工况的泄能电阻阻值参数和投切控制策略,以避免直流系统闭锁.而对于直流故障穿越,直流输电线路电压迅速跌落,可通过快速检出故障利用 DCCB 快速隔离故障来解决该情况下的低电压问题,故本文给出一种就地检测就地保护的故障隔离方法.最后,本文以提高基于 MMC 的多端柔性直流输电系统(multi-terminal flexible DC transmission system based on modular multilevel converter, MMC-MTDC)交直流故障穿越能力为目标,结合控制策略和硬件设备,设计了适用于交直流混联系统的故障穿越协调控制策略,并基于该策略研究了该策略下交直流线路的故障特征.

1 并网拓扑及控制策略

图 1 为永磁直驱风电经柔性直流并网的交直流混联系统拓扑.

图中 WFMMC 和 GSMMC2 是送端换流站, GSMMC1 是受端换流站. M、N 侧分别为交流并网联络线 L1 的柔直侧和电网侧, M 点为并网点.大型永磁直驱风场经主变压器将电能从 WFMMC 送入 MMC-MTDC,并在 GSMMC1 端口处与 GSMMC2 送入的电能汇集,通过 GSMMC1 并入交流电网.为提高系统故障穿越能力,直流系统引入了 DCCB、卸荷电阻 R_1 、 R_2 .

MMC 基本控制为 PQ 解耦控制,每个 MMC 有两个控制裕度,图 2 给出了 MMC 内外环控制器结构图.故而,在图 1 中 WFMMC 控制风场侧的交流电压幅值和频率,为永磁同步发电机组提供稳定的集电系统;GSMMC2 进行定有功功率和定无功功率的控制;GSMMC1 进行定直流电压和定无功功率的控制.站域级控制采用主从电压裕度控制策略, GSMMC1 为主控站, GSMMC2 和 WFMMC 为从控

站. u_{dc2} 为 GSMMC2 端口直流电压, 设 $u_{dc.lim}$ 为直流电压上限值, 为避免电压波动而引起主从站反复切

换, u_{dc2} 通过二阶滤波器得到 $u_{dc2.pu.ctl}$ 信号, 当检测到 $u_{dc2.pu.ctl} \geq u_{dc.lim}$, 立刻进行主从站角色的转换.

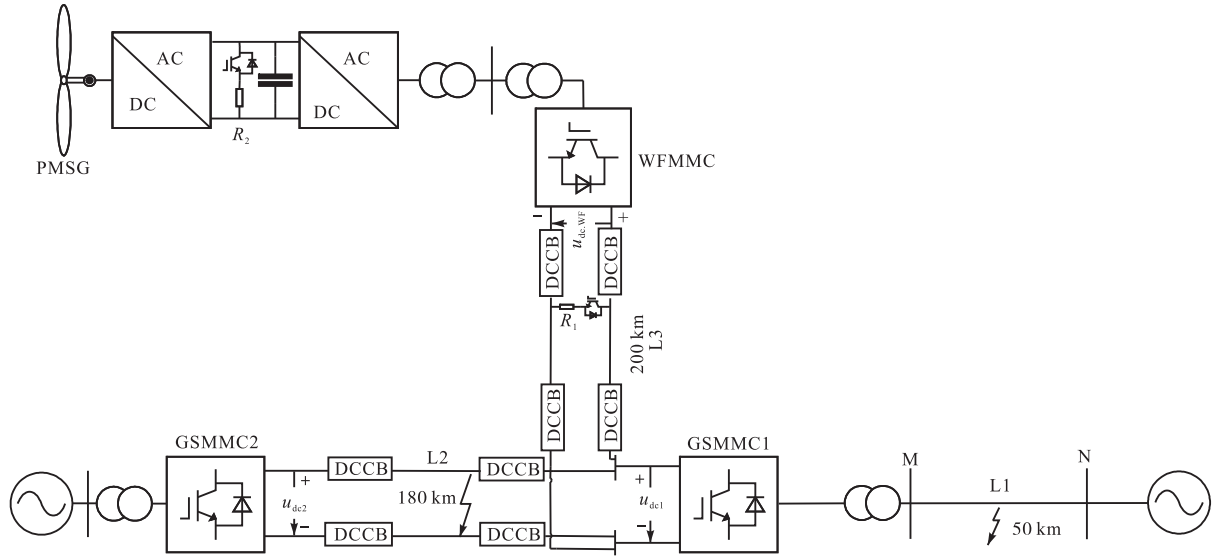


图 1 交直流混联系统拓扑

Fig.1 Topology of the AC/DC hybrid system

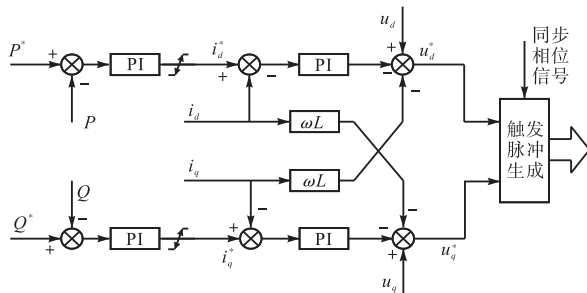


图 2 内外环控制器结构框图

Fig.2 Structure block diagram of the inner and outer loop controllers

2 交直流故障穿越控制方案

2.1 交流故障穿越协调控制方案

当交流系统 L1 线路发生故障时, 并网点电压跌落, MMC 输出电流迅速达到限幅值, 各换流站间累积不平衡功率, 致使直流电压上升.

对于故障时交流系统低电压问题, 采取无功优先控制策略通过向电网注入无功电流支撑电网电压恢复; 采取抑制负序电流控制策略以保护电力电子器件, 降低直流系统二倍频的波动.

对于故障时直流系统过电压问题, 在主从站间有功功率协调控制下降低 GSMMC2 输入功率, 故障严重时甚至将该站转变为逆变站平衡功率; 当 WFMDC 端口直流电压 $u_{WF.pu}$ 超过 $u_{dc.lim}$, 通过投切降压法和卸荷电阻 R_1 , 将直流电压抑制在一定的范

围内. 假定故障期间, 风速不变, 风场捕获的能量不变, 送入 MMC-MTDC 有功功率减少, 而导致全功率变换器直流电容电压上升. 当直流电容电压上升到超过阈值, 投入卸荷电阻 R_2 .

方案中降压法可按下式对 WFMDC 交流电压参考值 u_{acref} 的控制进行改进

$$u_{dref} = u_{acref} - k(u_{WF.pu} - u_{dc.lim}) \quad (1)$$

式中: $k = u_{acref} / (u_{max} - u_{dc.lim})$; u_{dref} 为交流 d 轴电压参考值; u_{max} 为直流电压最大值.

方案中卸荷电阻 R_1 阻值计算式^[18]为

$$R_1 = \frac{u_{dc.lim}^2}{\Delta P_{max}} \quad (2)$$

式中 ΔP_{max} 为最大不平衡功率.

2.2 直流故障穿越协调控制方案

因 HB-MMC 不具备隔离直流故障的能力, 当 MMC-MTDC 直流线路故障发生时, 直流电压迅速下降为 0, 故障过程分为 3 个阶段^[19]: ①MMC 未闭锁, 电容放电; ②MMC 闭锁前, 桥臂电抗和交流系统向故障点馈入电流; ③MMC 闭锁后, 仅余交流系统向故障点馈入电流. 为此, 本文采用可迅速切断故障电流, 保证断路器机械开关无弧分断的混合式 DCCB, 实现方法可参见文献[20].

对于直流线路发生故障时的低电压问题, 采取就地检测就地保护的策略, 通过检测直流线路两端的电流方向是否均指向 DCCB 保护区域, 且流经 DCCB 电流是否超过正常电流最大值的两倍(或变化量为两

倍), 来判断该条直流线路是否发生直流故障. 该策略既满足了 DCCB 的速动要求, 也可在 MMC 闭锁前完成故障线路隔离, 保证未故障直流线路快速恢复正常运行状态. 故障期间, 由于 WFMMC 向 MMC-MTDC 输入功率下降, 可能造成全功率变换器直流侧电容过电压, 这部分处理方法与交流故障穿越方案相似, 不再赘述.

3 交直流故障特征理论分析

本文中, U 为电压相量, I 为电流相量, P 、 Q 分别为 MMC 输出有功、无功功率; Z_T 为换流变压器的漏抗, Z_L 为线路 MN 的阻抗, Z_N 为 N 侧所连接的交流系统的等值阻抗, R_f 为故障点处的过渡电阻; 上标“+”、“-”、“0”表示正、负、零序分量, “*”表示参考值. 下标“p.u.”表示标么值. 仿真图中, $|I|$ 为保护安装处电流幅值, β 为其对应角度.

3.1 交流故障特征理论分析

3.1.1 MMC 输出电流

由 MMC 的工作原理和 PLL 的作用(输出故障前并网点电压相位), 换流站输出相位以 M 侧保护安装处电压相位为参考值. 在采用无功优先控制策略下, MMC 输出 d 、 q 轴电流参考值可表示为

$$i_q^* = \begin{cases} 0 & U_{\text{rms}} \geq 0.9 \\ \frac{3}{2}(0.9 - U_{\text{rms}}) & 0.2 \leq U_{\text{rms}} < 0.9 \\ 1.1 & U_{\text{rms}} < 0.2 \end{cases} \quad (3)$$

$$i_d^* = \begin{cases} \frac{P^*}{U_{\text{rms}}} & U_{\text{rms}} \geq 0.9 \\ \sqrt{I_{\text{lim}}^2 - i_q^{*2}} & U_{\text{rms}} < 0.9 \end{cases} \quad (4)$$

式中: U_{rms} 为并网点三相电压有效值; I_{lim} 为限幅器输出电流限制值.

在抑制负序电流策略和接线方式为 YN, d11 的联接变压器影响下, 有

$$i_q^- = i_d^- = 0, i_q^* = i_q^{+*}, i_d^* = i_d^{+*} \quad (5)$$

采用限幅器后, MMC 实际输出电流幅值为

$$I_{\text{max}} = \begin{cases} \sqrt{i_d^{*2} + i_q^{*2}} & \sqrt{i_d^{*2} + i_q^{*2}} < I_{\text{lim}} \\ I_{\text{lim}} & \sqrt{i_d^{*2} + i_q^{*2}} \geq I_{\text{lim}} \end{cases} \quad (6)$$

由以上公式可得, MMC 输出电流可表示为

$$\begin{cases} I_A = I_{\text{max}} \cos(\omega t + \varphi) \\ I_B = I_{\text{max}} \cos(\omega t + \varphi - 2\pi/3) \\ I_C = I_{\text{max}} \cos(\omega t + \varphi + 2\pi/3) \end{cases} \quad (7)$$

式中 φ 为短路电流与 MMC 出口处电压的夹角, $\varphi =$

$\arctan(-Q^*/P^*)$.

由式(7)可知, 并网交流联络线 L1 故障时 GSMC1 输出电流为受控于电压具有非线性、幅值受限、无负序电流分量特性的三相交流电流.

3.1.2 发生接地故障的故障特征分析

以 A 相接地为例, 初相角 $\delta_A = 0$, 若以其他相为例, $\delta_B = -2\pi/3$, $\delta_C = 2\pi/3$.

A 相接地故障点各序电流为

$$I_{fA}^+ = I_{fA}^- = I_{fA}^0 = \frac{U_{f|0|}}{Z_{\Sigma}^+ + Z_{\Sigma}^- + Z_{\Sigma}^0 + 3R_f} \quad (8)$$

式中: $U_{f|0|}$ 为故障前故障点处的电压; Z_{Σ}^+ 、 Z_{Σ}^- 、 Z_{Σ}^0 分别为正、负、零序网络总阻抗.

M、N 侧三序电流分量参考电流表达式为

$$\begin{cases} I_{MA}^+ = I_{Mm}^+ \angle(\varphi + \delta_A) \\ I_{MA}^- = 0 \\ I_{MA}^0 = \frac{(1-\alpha')Z_L^0 + Z_N^0}{Z_T^0 + Z_L^0 + Z_N^0} I_{fA}^0 = Z_{M0} I_{fA}^0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} I_{NA}^+ = I_{fA}^+ - I_{MA}^+ \\ I_{NA}^- = I_{fA}^- \\ I_{NA}^0 = (1 - Z_{M0}) I_{fA}^0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $I_{Mm}^+ = 2(P^{*2} + Q^{*2})^{1/2} / (3U_M^+)$, I_{Mm}^+ 为 M 侧 A 相正序故障电流幅值; U_M^+ 为 M 侧保护安装处正序电压; α' 为母线 M 到故障点的线路距离与线路 MN 长度的比值; Z_M^0 为零序电流分配系数.

M、N 侧故障电流分别为

$$I_{MA} = I_{MA}^+ + I_{MA}^- + I_{MA}^0 = I_{Mm}^+ \angle(\varphi + \delta_A) + Z_{M0} I_{fA}^0 \quad (11)$$

$$I_{NA} = I_{NA}^+ + I_{NA}^- + I_{NA}^0 = (3 - Z_{M0}) I_{fA}^+ - I_{Mm}^+ \angle(\varphi + \delta_A) \quad (12)$$

3.1.3 发生短路故障的故障特征分析

以 AB 两相短路故障为例. N 侧只有正序与负序, M 侧仅有正序. 故障点只有正序、负序的电压、电流分量. M 侧故障相电流为

$$\begin{cases} I_{MA} = I_{MA}^+ + I_{MA}^- = I_{Mm}^+ \angle\varphi \\ I_{MB} = I_{MB}^+ + I_{MB}^- = I_{Mm}^+ \angle(\varphi - 2\pi/3) \end{cases} \quad (13)$$

根据第 3.1.2 节分析, 故障点负序电流主要由 N 侧提供, N 侧正序电流比 M 侧电流大. 由该故障边界条件, N 侧非故障相电流表达式为

$$I_{NC}^+ + I_{NC}^- = 0 \quad (14)$$

可得

$$\begin{cases} I_{fC}^+ = -I_{fC}^- = -I_{fC}^0 = U_{f|0|} / (Z_{\Sigma}^+ + Z_{\Sigma}^- + R_f) \\ I_{fC}^+ = I_{fC}^+ - I_{fC}^0 \\ I_{fA} = -I_{fB} = \sqrt{3} I_{fC}^+ \angle(-\pi/2) \end{cases} \quad (15)$$

由以上公式推导可得如下结论:①在抑制负序电流控制策略作用下,柔直系统向故障点提供的负序电流近乎为零;②在限幅器的作用下,MMC 输出的故障电流幅值与额定电流幅值相差不大;③M 侧故障电流各序分量的幅值和相角与变压器接线方式、系统线路参数、故障类型、过渡电阻大小、故障位置、有功和无功参考值等诸多因素密切相关。

3.2 直流故障特征理论分析

极间短路是直流侧最严重的故障,分析在 T 时刻发生极间短路故障的直流侧故障特征,MMC 闭锁前电容放电等效回路如图 3 所示。

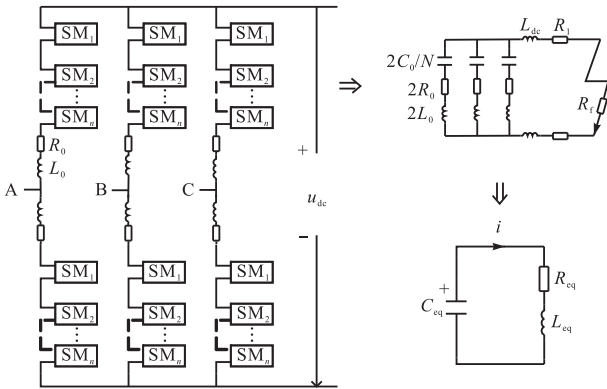


图 3 MMC 闭锁前电容放电等效回路

Fig.3 Equivalent circuit of capacitor discharge before MMC blocking

图 3 中, $C_{eq} = 6C_0/N$, $R_{eq} = 2R_0/3 + 2R_1 + R_f$, $L_{eq} = 2L_0/3 + 2L_{dc}$. C 为子模块电容, N 为投入子模块数量, C_{eq} 为放电回路等效电容; R_0 为桥臂电阻, R_1 为直流线路电阻, R_f 为故障过渡电阻, R_{eq} 为放电回路等效电阻; L_0 为桥臂电抗, L_{dc} 为平波电抗器电感, L_{eq} 为放电回路等效电感。

直流线路故障短路电流主要为子模块电容放电电流,且由于子模块电容、限流电感特性,故障发生时的初始条件为

$$\begin{cases} u_c(0_+) = u_c(0_-) = u_0 \\ i_L(0_+) = i_L(0_-) = i_0 \end{cases} \quad (16)$$

由等效放电回路可得

$$u_{dc} + R_{eq}C_{eq} \frac{du_{dc}}{dt} + L_{eq}C_{eq} \frac{d^2u_{dc}}{dt^2} = 0 \quad (17)$$

由式(16)、(17)可解得直流侧短路电流、电压为

$$\begin{cases} i(t-T) = e^{-\delta(t-T)} \sqrt{\frac{u_0^2 C_{eq}}{L_{eq}} + i_0^2} \sin(\omega(t-T) + \alpha) \\ u(t-T) = e^{-\delta(t-T)} \sqrt{\frac{i_0^2 L_{eq}}{C_{eq}} + u_0^2} \cos(\omega(t-T) + \alpha) \end{cases} \quad (18)$$

当设有 DCCB 时,经过故障检测和换流时间 t_1

后,短路电流才经耗能支路,迅速衰减为 0. 整个阶段,短路电流峰值为 $i(t_1-T)$. 经时间 t_2 后,短路电流下降为 0, $t_1 \sim t_2$ 过程直流电压可表示为

$$u_{def} = u_{dc}(t_1-T) - \frac{1}{C_{eq}} \int_{t_1}^{t_2} i_{dc}(t) dt \quad (19)$$

由 MMC 工作特性可知,以 A 相上桥臂电流 i_{pa} 为例,电流构成为

$$i_{pa} = \frac{i_{dc}}{3} + \frac{i_a}{2} \quad (20)$$

式中: i_{dc} 为直流电流; i_a 为 MMC 交流侧电流。

$$S_N = \frac{P_{dc}}{\cos\theta} = \frac{u_{dc}i_{dc}}{\cos\theta} = \frac{3i_{am}Mu_{dc}}{4} \quad (21)$$

式中: M 为调制比(模型中为 0.89); P_{dc} 为直流功率; θ 为 MMC 交流侧功率因数角; u_{dc} 为直流电压; i_{dc} 为直流电流; i_{am} 为 MMC 交流侧电流的幅值。

由式(21)可得,MMC 交流侧电流的幅值为

$$i_{am} = \frac{4i_{dc}}{3M\cos\theta} \quad (22)$$

由式(20)~(22)可得,桥臂电流最大值 $i_{pa,max}$ 为

$$i_{pa,max} = \frac{i_{dc,max}}{3} + \frac{2i_{dc,max}}{3M\cos\theta} < 2i_{arm,lim} \quad (23)$$

式中: $i_{dc,max} = (u_0^2 C_{eq}/L_{eq} + i_0^2)^{1/2}$; $i_{arm,lim}$ 为桥臂电流限制值. 限流电抗需满足系统动态响应时间 t_0 的要求,则

$$L_{dc} < Rt_0 - 1.5L_{arm} \quad (24)$$

可根据系数设计要求选择合适的 L_{dc} , 满足系统动态响应时间要求和快速隔离直流故障避免 MMC 闭锁的要求。

4 仿真验证

为验证故障穿越方案有效性,基于 RTDS 搭建了如图 1 所示的仿真模型. WFMCC、GSMCC1、GSMCC2 额定功率分别为 250 MW、400 MW、150 MW, MMC-MTDC 额定直流电压为 ± 200 kV. GSMCC1 子模块数量为 200,子模块额定电压为 2 kV,桥臂电流额定值为 1 kA. L_1 线路额定交流电压为 220 kV,线路正序阻抗为取 $0.076 + j0.338 \Omega/\text{km}$,零序阻抗为 $0.284 + j0.824 \Omega/\text{km}$,N 侧所连接交流系统等值阻抗为 $5.000 + j7.798 \Omega/\text{km}$,联接变压器漏抗为 0.18. 取 ΔP_{max} 为 250 MW, $u_{dc,lim}$ 为 1.05 p.u.. 取 R_1 为 705.6Ω , R_2 为 35.3Ω . 根据式(23)~(24), L_{dc} 选为 400 mH. 考虑本文目的是为获得详细的故障特征数据,故障起始时刻均设为 0.25 s,且均为永久性故障。

4.1 交流故障穿越策略可行性验证

三相短路故障为最严重的故障,故通过设置线路L1中点处发生三相短路故障,来验证交流故障穿越控制策略的有效性.

图4给出了各MMC的传输功率、WFMMC端口电压 $u_{WF,pu}$ 、主从控制信号 $u_{dc2,pu,ctl}$ 、卸荷电阻触发信号 T_{dc1} 和 T_{dc2} 以及全功率变换器电容电压 $V_{dc,pu}$ 的仿真结果.其中,在故障后0.1s P_{MMC1} 下降至接近0的水平,GSMMC1闭锁. $u_{WF,pu}$ 在0.28s超过阈值1.05p.u.,降压法作用后 P_{WFMMC} 降低了约40MW;自0.28s开始卸荷电阻 R_1 在 T_{dc1} 脉冲信号作用下反复

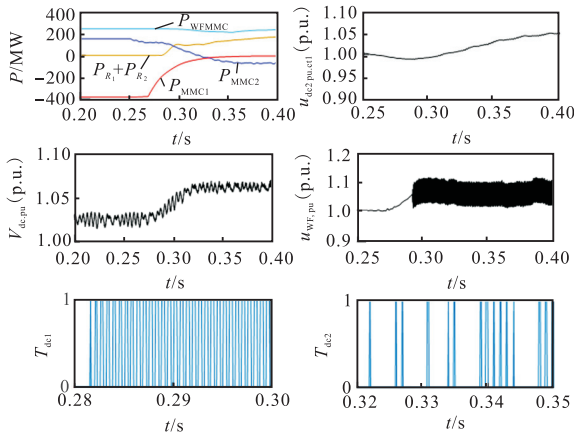


图4 三相短路下直流系统故障特征

Fig.4 Fault characteristics of the DC system under three-phase short circuit

投切消耗了约100MW;自0.32s开始 R_2 在 T_{dc2} 脉冲信号作用下反复投切消耗了约50MW,将 $u_{WF,pu}$ 控制在1.0~1.1p.u.范围内波动.在站间有功功率协调下,GSMMC2逐步由送入有功功率调整为送出有功功率,控制信号 $u_{dc2,pu,ctl}$ 在0.38s达到主从站切换动作阈值,实现主从站平稳过渡.整个过程中,MMC-MTDC直流电压以及全功率变换器直流电容电压的波动范围均未超过1.1p.u.,且风场输出功率并未受大的影响.

4.2 交流侧故障特征分析

当设置交流线路L1中点处发生A相接地故障时,MMC输出特性如图5所示,分别给出了 U_{rms} 与 I_{max} 随时间变化的曲线,结合图6中A相接地故障特征的 d,q 轴电流曲线分析.在故障发生后, U_{rms} 快速跌落,在无功优先的控制策略下遵循式(3)给出 i_q^* ,系统快速响应发出跟踪 i_q^* 实时变化的 i_q . U_{rms} 最终在0.75~0.80p.u.范围内波动, i_q 在0.18p.u.左右波动,结

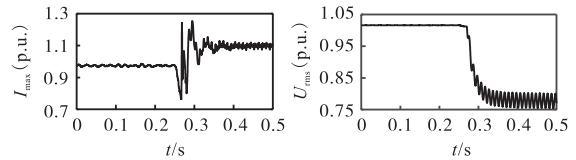


图5 GSMMC1输出特性曲线

Fig.5 Spatial curve of the output characteristics of GSMMC1

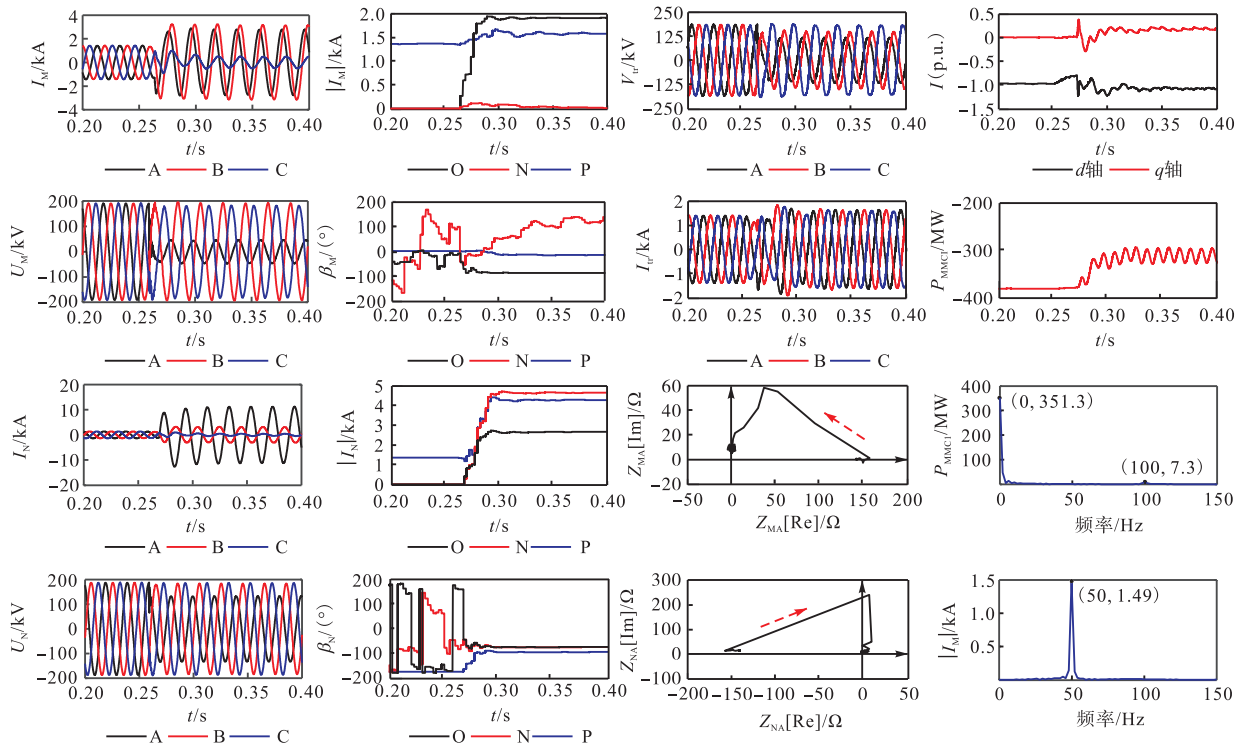


图6 A相接地短路故障特征

Fig.6 Fault characteristics of phase A to ground short circuit

果与理论公式推导相吻合,并体现了故障期间 MMC 输出电流具有受控于电压、非线性以及幅值受限的特点.

(1) 当发生金属性接地故障时, M 侧零序阻抗角逐渐稳定为 77° , A、B 相电流幅值增大, C 相幅值减小; A 相超前 B、C 相约 38° , BC 两相近似同相;故障相电流零序分量占优,正序次之. M 侧保护安装处故障相电压下降为 0.24 p.u. ,三相电压相位差互为 120° .

(2) N 侧由于连接交流电网,且由式(9)~(10)以及 M 侧保护安装处故障电流特征,可以推得 N 侧保护安装处负序电流分量应略大于正序.且在系统参数影响下, A 相电流正序分量相位由 -180° 逐渐稳定在 96.8° ,负序、零序电流相位亦稳定在 75.9° .因此, N 侧三相电流的幅值呈现 A、B 相幅值上升, C 相幅值减小,且 A 相幅值最大,远大于 B 相的特性;三相电流的相位关系呈现为 A 相与 B、C 相近乎反向的特性;故障相三序分量,呈现负序略高于正序分量,零序最小的特性.故障相电压下降为 0.7 p.u. ,三相电压相位差互为 120° .

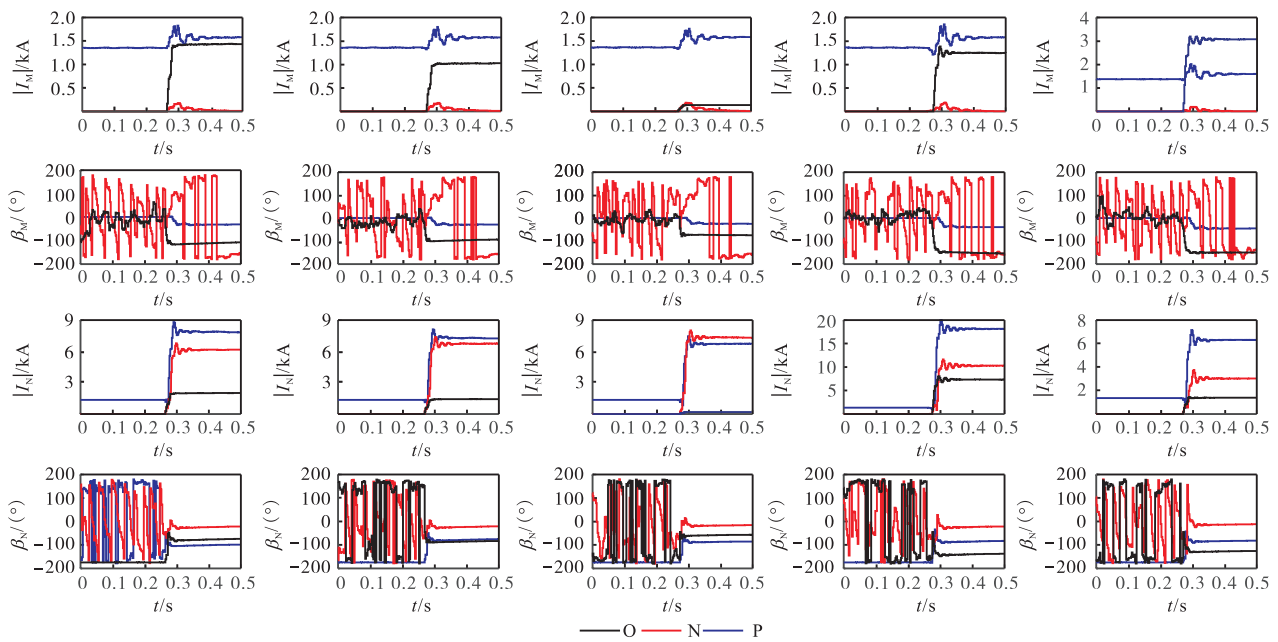
由于无功优先策略影响, MMC 输出 d 轴电流和 q 轴电流分别在 1.07 p.u. 、 0.18 p.u. 左右波动.变压器阀侧电流 I_{tr} 上升为限幅值 1.1 p.u. 、变压器阀侧 A 相电压 V_{tr} 下降为 100 kV , GSMC1 功率降低约 50 MW .单相接地故障保护安装处测量阻抗元件采

用相电压零序电流补偿的相电流阻抗继电器接线方式.当发生 A 相金属性接地故障时, M 侧和 N 侧保护安装处测量阻抗模值均不断减小,阻抗角趋于 90° ,测量阻抗最终落于复阻抗平面的上半平面,呈感性.

对 M 侧 A 相电流和 P_{MMC1} 进行谐波分析发现,故障相电流以 50 Hz 工频分量为主,含有少量的非整次谐波; P_{MMC1} 以直流量为主,含有由故障点负序电压和交流正序电流产生的少量二次谐波.

为了分析验证过渡电阻大小和故障点位置对 M、N 侧保护安装处故障特征的影响.假设 L1 线路发生 AB 两相短路接地故障,图 7 中仅给出 A 相的故障特征.首先,在故障点位置处于 L1 线路中点时,对比 5Ω 、 10Ω 、 100Ω 过渡电阻下发生故障时 A 相的故障特征,如图 7(a)~(c)所示.当发生经过渡电阻接地故障时,随着过渡电阻阻值的增大,零序电流随之减小;当经高阻接地时,零序电流近乎为零. M、N 侧三序阻抗角(除 M 侧负序)随过渡电阻增大而减小.其次,分别对比了 N 侧保护安装处到 M 侧保护安装处全线长的 10% 、 90% 处发生故障时 A 相的故障特征,如图 7(e)~(f)所示.故障点越靠近 MMC, MMC 提供的短路电流越大,零序占比越大.

由于篇幅所限,此处对相间短路故障不再详细分析.假设交流线路 L1 中点处发生 AB 两相短路故障,故障特征如图 8 所示.



(a) 过渡电阻 5Ω (b) 过渡电阻 10Ω (c) 过渡电阻 100Ω (d) 线路 L1 的 10% (e) 线路 L1 的 90%

图 7 AB 相短路接地故障不同因素对 A 相故障特征的影响

Fig.7 Influence of different factors on the characteristics of phase A fault under the condition of phase AB short circuit to ground fault

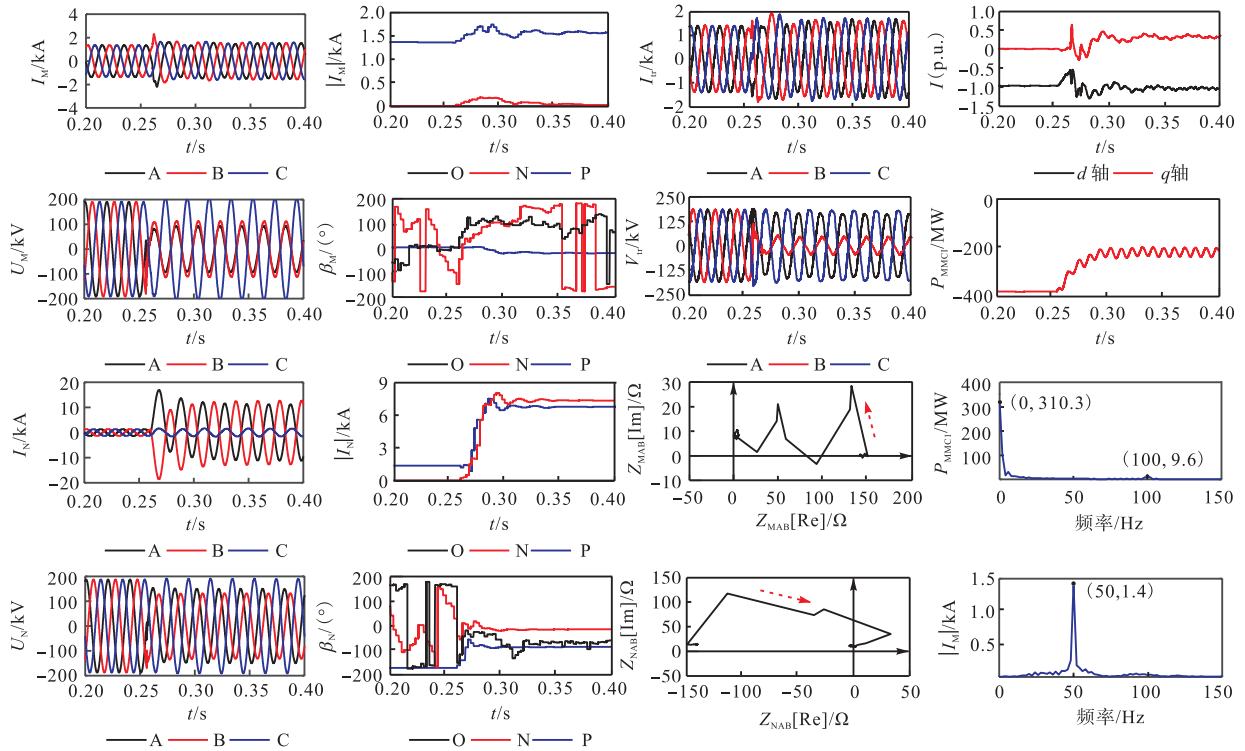


图 8 AB 相间短路的故障特征

Fig.8 Fault characteristics of phase AB short circuit

4.3 直流侧故障穿越可行性及其直流故障特征分析

假设如图 1 所示 L2 线路靠近 GSMC1 处发生极间短路故障,故障起始时刻为 0.25 s,进行直流系统故障穿越策略可行性分析以及直流侧故障特征研究,如图 9 所示.

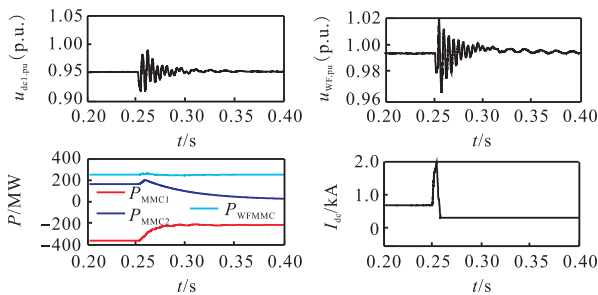


图 9 两极短路直流系统故障特征

Fig.9 Fault characteristics of the pole-to-pole short circuit

发生故障后, DCCB 可快速动作隔离故障,且在定直流电压等控制策略的协调下, L3 线路所受影响相对较小. 故障期间, L3 线路两侧电压下降幅度较小,并在故障隔离后恢复±200 kV 直流电压等级,风场传输功率基本稳定,风电场全功率变换器电容电压小于 1.05 p.u.. 且在整个动作过程中, GSMC2 流向短路点电流 I_{dc} 最大值仅为 1.7 kA, 小于 GSMC1 闭锁阈值 2.0 kA, MMC 不会闭锁. 由此,证明了本文所

提的直流故障穿越策略的有效性.

在直流系统未装设直流断路器发生两极短路故障时,对故障过程 MMC 馈入的短路电流组成进行分析,如图 10 所示. 阶段 1: MMC 子模块闭锁前主要由电容放电电流和交流系统馈入的短路电流组成,在故障后 6 ms 电容放电完毕短路电流达到峰值;阶段 2: MMC 闭锁后主要由电抗器续流电流和交流系统馈入的短路电流组成,故障后约 0.256 s 续流电流衰减为 0;阶段 3: 仅交流系统向故障点提供短路电流,达到新稳态.

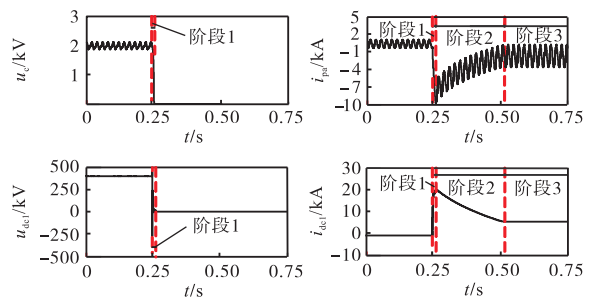


图 10 两极短路故障 MMC 动作阶段特征

Fig.10 Characteristics of the MMC action phase in the pole-to-pole short circuit fault

发生两极短路故障时,如图 11(a)所示,当未装设 DCCB 时,文献[21]提到此时交流故障特征应与三相短路时相似,但从变压器阀侧电压、电流幅值变化

来看,直流故障对交流侧的影响甚至大于三相短路, d 、 q 轴电流越限,致使交流系统馈入的短路电流过大,严重威胁到了 MMC 的安全运行.同时观察 M 侧保护安装处的各项特征,电压幅值下降为 106 kV 左右,电流幅值上升近 2.6 倍,且在暂态过程出现了较大的负序分量;M 侧 A 相测量阻抗在复平面中由第四象限变化到第三象限,阻抗模值不断减小,呈容性;M 侧 AB 相间测量阻抗变化规律与上述类似,最终落于第四象限,呈容性.

如图 11 (b) 所示, DCCB 迅速隔离直流故障, 变压器阀侧电压 V_U 幅值基本未发生变化, 但导致了 GSMC1 功率缺额而使得 d 轴电流下降为 0.65 p.u. 左右. 同时观察 M 侧保护安装处的各项特征, 电压幅值基本没变, 电流幅值下降, 且三序分量可认为仅含正序分量, M 侧 A 相以及 AB 相间测量阻抗都在第一和第四象限变化, 最终趋于第一象限, 呈感性.

5 结 论

(1) MMC-MTDC 在应用故障穿越策略后, 当直流侧故障时, 能够快速隔离故障, 使其具有更高的可靠性; 当交流并网侧故障时, 直流电压波动被抑制在 1.1 倍额定值范围内, 且系统能快速过渡到新稳态运行, 证明了该策略的有效性和系统良好的可调性.

(2) 交流并网联络线故障特征与控制策略和故障条件密切相关. 交流并网联络线故障时, MMC 具有输出电流受控于电压的非线性、幅值受限、相角受控等特征的电源输出特性.

(3) 所采用故障隔离方案, 可使 DCCB 在 6 ms 内 MMC 闭锁前隔离直流故障. 直流故障特征主要与直流断路器、子模块电容放电过程和平波电抗器相关. 直流系统双极短路故障时, 在不具备直流断路器的情况下, 交流系统会出现较大的负序电流分量、电流越限以及测量阻抗呈容性的特征, 其故障对系统的影响程度较之与交流并网联络线三相短路故障对系统的影响程度更大.

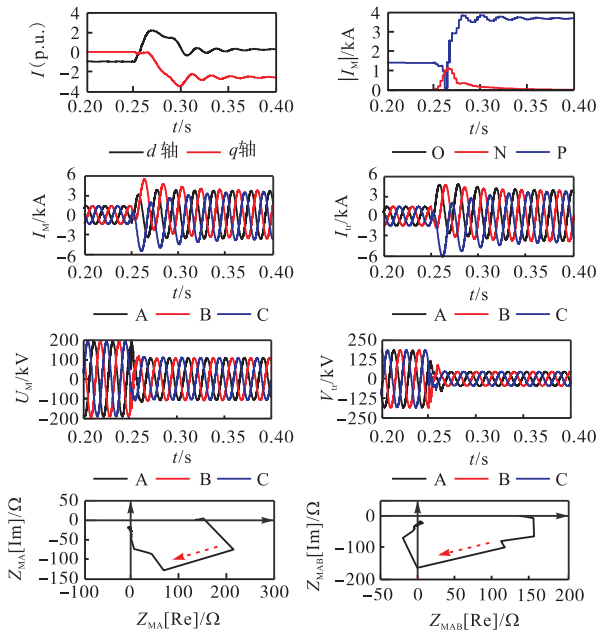
参考文献:

[1] Kurtoglu M, Eroglu F, Arslan A O, et al. Recent contributions and future prospects of the modular multilevel converters: A comprehensive review[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(3): e2763.

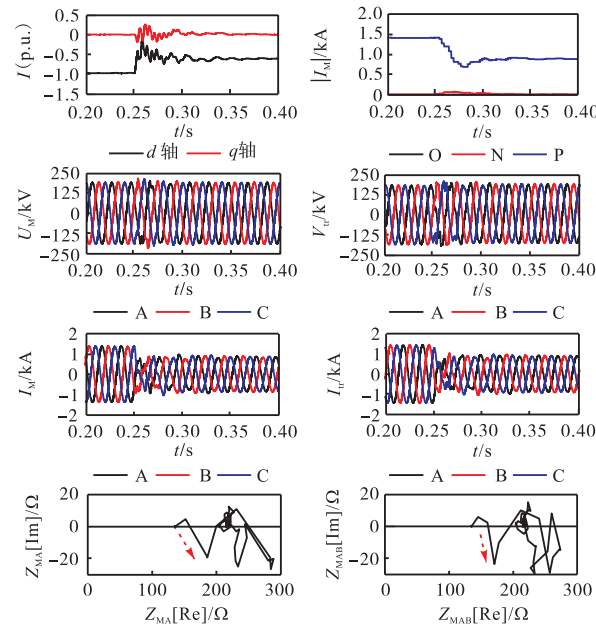
[2] Farshad M. Ultra-high-speed non-unit non-differential protection scheme for buses of MMC-HVDC grids[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(9): 1541-1549.

[3] 卜广全, 李英彪, 王姗姗, 等. MMC 对交流系统三相短路故障短路电流影响的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6303-6312.

Bu Guangquan, Li Yingbiao, Wang Shanshan, et al. Analysis of the short-circuit current of MMC-HVDC[J].



(a) 无直流断路器



(b) 含直流断路器

图 11 有、无直流断路器直流故障时交流系统的故障特征
Fig.11 Fault characteristics of the AC system under DC fault with or without DC circuit

- Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6303-6312 (in Chinese).
- [4] 刘树, 梅红明, 刘斌, 等. 正负序解耦控制的柔性直流系统交流故障特征[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(2): 68-76.
Liu Shu, Mei Hongming, Liu Bin, et al. Characteristics of AC faults in flexible DC system under decoupling control of positive and negative sequences[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(2): 68-76 (in Chinese).
- [5] 李盛伟, 李永丽, 孙景钊, 等. 光伏发电系统孤岛运行状态的故障特性分析[J]. 天津大学学报, 2011, 44(5): 401-405.
Li Shengwei, Li Yongli, Sun Jingliao, et al. Fault characteristic analysis of photovoltaic power system islanding operation[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(5): 401-405 (in Chinese).
- [6] 梁莹玉, 李武林, 卢正杰, 等. MMC-HVDC 对交流线路电流相位差动保护的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 95-101.
Liang Yingyu, Li Wulin, Lu Zhengjie, et al. Influence of MMC-HVDC on current phase differential protection of AC line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 95-101 (in Chinese).
- [7] Xu Jianzhong, Zhu Sicheng, Li Chengyu, et al. The enhanced DC fault current calculation method of MMC-HVDC grid with FCLs[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(3): 1758-1767.
- [8] 裘鹏, 黄晓明, 王一, 等. 高压直流断路器在舟山柔直工程中的应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 403-408.
Qiu Peng, Huang Xiaoming, Wang Yi, et al. Application of high voltage DC circuit breaker in Zhoushan VSC-HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 403-408 (in Chinese).
- [9] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 1-7.
Wang Shanshan, Zhou Xiaoxin, Tang Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 1-7 (in Chinese).
- [10] 孙吉波, 王宇, 刘崇茹, 等. 基于 MMC 的多端直流电网双极短路故障电流计算[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 72-78.
Sun Jibo, Wang Yu, Liu Chongru, et al. Pole-to-pole short circuit current calculation of multi-terminal DC grid based on MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 72-78 (in Chinese).
- [11] 王成山, 李微, 王议锋, 等. 直流微电网母线电压波动分类及抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 84-98.
Wang Chengshan, Li Wei, Wang Yifeng, et al. DC bus voltage fluctuation classification and restraint methods review for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 84-98 (in Chinese).
- [12] 喻建瑜, 刘崇茹, 王洁聪. 不对称工况下 MMC-HVDC 的故障穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5653-5665.
Yu Jianyu, Liu Chongru, Wang Jiecong. Fault ride-through control strategy of MMC-HVDC system under asymmetric grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5653-5665 (in Chinese).
- [13] 王林, 郭贤朝, 姚传涛, 等. MMC-HVDC 的新型交流故障穿越策略[J]. 电气传动, 2020, 50(12): 48-53.
Wang Lin, Guo Xianchao, Yao Chuantao, et al. A new AC fault ride-through strategy of MMC-HVDC[J]. Electric Drive, 2020, 50(12): 48-53 (in Chinese).
- [14] Chen Rui, Jia Ke, Bi Tianshu, et al. Coordinated fault ride through strategy for offshore wind integration system[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018, 170(4): 1-5.
- [15] 李国庆, 张林, 江守其, 等. 风电经双极混合型 MMC-HVDC 并网的直流故障穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 27-36.
Li Guoqing, Zhang Lin, Jiang Shouqi, et al. Coordinated control strategies for DC fault ride-through of wind power integration via bipolar hybrid MMC-HVDC overhead lines[J]. Power System Protection and Control,

- 2021, 49(10): 27-36(in Chinese).
- [16] Li Weixing, Zhu Meng, Chao Pupu, et al. Enhanced FRT and postfault recovery control for MMC-HVDC connected offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1606-1617.
- [17] 蔡婷婷, 穆 钢, 严干贵, 等. 提高海上风电场经 MMC 联网系统故障穿越能力的柔性泄能电阻控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 166-173.
- Cai Tingting, Mu Gang, Yan Gangui, et al. A flexible control strategy of breaking resistor to enhance fault-ride-through ability for offshore wind farms integrated to grid via MMC[J]. Power System Technology, 2020, 40(1): 166-173(in Chinese).
- [18] 任永峰, 胡宏彬, 薛 宇, 等. 基于卸荷电路和无功优先控制的永磁同步风力发电机组低电压穿越研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 11-18.
- Ren Yongfeng, Hu Hongbin, Xue Yu, et al. Low voltage ride-through capability improvement of PMSG based on chopper circuit and reactive priority control[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 11-18(in Chinese).
- [19] 宋国兵, 陶 然, 李 斌, 等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12.
- Song Guobing, Tao Ran, Li Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12(in Chinese).
- [20] 徐 政, 肖晃庆, 徐雨哲. 直流断路器的基本原理和实现方法研究[J]. 高电压技术, 2018, 42(2): 347-357.
- Xu Zheng, Xiao Huangqing, Xu Yuzhe. Study on basic principle and its realization methods for DC circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2018, 42(2): 347-357(in Chinese).
- [21] 谢仲润. 交直流混合配电网保护技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- Xie Zhongrun. Study on Protection Technology of AC-DC Hybrid Distribution Grid[D]. Jinan: Shandong University, 2020(in Chinese).

(责任编辑: 樊素英)