

渝鄂背靠背柔直系统交流故障穿越策略研究

徐瑞林¹, 李明睿², 张澍镗³, 朱晟毅¹, 魏应冬², 侯灵犀²

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123;
2. 清华大学电机系, 北京 100084; 3. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

摘要: 针对柔直系统交流故障可能造成的系统安全与稳定性问题,本文结合渝鄂背靠背柔直系统,考虑实际工程中存在的采样与控制延时,提出了受端交流故障期间的稳流控制策略,包括交流电流限幅控制、直流电压前馈控制、直流电流控制、以及发生严重故障时的换流站暂时性闭锁策略,可有效减小故障与恢复期间交、直流侧的过流与过压,降低器件损坏风险,提高系统的故障穿越能力。基于 PSCAD/EMTDC 的电磁暂态仿真验证了本文提出的控制策略的有效性。

关键词: 渝鄂柔直; 附加控制; 交流故障穿越; 暂时性闭锁

DOI: 10.12067/ATEEE2001001 **文章编号:** 1003-3076(2020)06-0042-09 **中图分类号:** TM721.1

1 引言

随着模块化多电平变流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 技术的发展,基于电压源换流器的柔性直流输电系统 (Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC) 在电力系统中得到了大量应用。与传统直流输电相比,VSC-HVDC 可以实现有功功率和无功功率的快速、独立控制,无换相失败风险,不存在无功补偿问题^[1-4]。为解决川渝电网与华中东四省电网间跨区长链型电网存在的稳定性问题,国家电网公司规划了渝鄂背靠背柔性直流输电工程,利用现有 2 个 500kV 双回输电通道,建立南、北通道 2 座容量为 2500MW 的柔直背靠背换流站,可实现西南和华中电网的异步互联,有效优化系统的潮流分布,提高电网稳定水平^[5-7]。

当柔直系统交流端电网发生故障时,直流电压与交、直流电流均可能出现大幅波动,严重时甚至会超出柔直系统运行范围,危害柔直系统的安全稳定运行。针对柔直系统受端交流故障问题,文献[8]提出了减小送端功率传输的控制策略,但依赖于两站间的高速通讯,且功率下降幅度较难确定;文献

[9-11]采用了电压裕度控制方法,可有效减小直流电压冲击,但未给出故障期间交、直流电流的控制策略;文献[12-14]给出了交流故障电流的限流控制方法,但未考虑直流电流波动,也未考虑严重故障下的换流站闭锁问题。

对于近端严重交流故障,柔直系统交流端口迅速上升的故障电流可能导致换流站桥臂电流过大,超出器件承受范围,因此需对换流站进行闭锁保护。采用暂时性闭锁策略,即在桥臂过电流之后暂时闭锁换流站数十毫秒,之后重新解锁,有助于系统在暂时性故障下迅速重启动。另外,在故障期间解锁换流站并输出恒定的交流电流,可用于测定故障点位置,有助于修复线路故障。

为在交流故障期间维持直流电压稳定,限制故障电流,提高柔直系统的交流故障穿越能力,本文结合渝鄂背靠背柔性直流输电工程,对实现异步互联的柔直系统交流故障控制及保护策略进行研究。首先介绍了该工程的结构、参数与控制策略。然后,针对异步互联场景下的受端交流故障,提出了故障期间的稳流控制策略,包括交流电流限幅控制、直流电压前馈控制、直流电流控制以及发生严重故障时的换流站暂时性闭锁策略。最后,在 PSCAD/EMTDC

收稿日期: 2020-01-03

基金项目: 国家电网公司科技项目 (522000180001), 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项 (2016YFB0900600)

作者简介: 徐瑞林(1965-),男,江苏籍,教授级高级工程师,硕士,主要从事电力系统运行与控制工作;
李明睿(1995-),男,山东籍,博士研究生,研究方向为柔性直流输电与同相牵引供电。

仿真平台上搭建了渝鄂柔直工程的仿真模型,验证了所设计稳流控制策略的有效性。

2 异步互联场景下柔直系统建模

2.1 系统结构

以渝鄂背靠背柔直系统北通道为例,由两个 MMC 换流站组成,子模块采用半桥结构。两换流站直流侧直接相连,交流侧经变压器分别连接两个不同的交流系统。系统拓扑结构如图 1 所示。

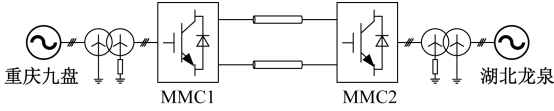


图 1 渝鄂背靠背柔性直流输电系统北通道结构

Fig.1 Structure of Yu-E north channel

渝鄂背靠背柔性直流输电系统北通道的系统参数如表 1 所示。

表 1 渝鄂背靠背柔直北通道系统参数

Tab.1 Parameters of Yu-E north channel

系统参数	渝侧	鄂侧
额定有功功率/MW	1250	1250
交流系统电压/kV	525	525
交流系统频率/Hz	50	50
最大三相短路电流/kA	15	41.5
额定直流电压/kV	±420	±420
额定直流电流/A	1488	1488
变压器额定容量/(MV·A)	1380	1380
变压器短路阻抗(pu)	0.14	0.14
变压器网侧额定电压/kV	525	525
变压器阀侧额定电压/kV	437.23	437.23
子模块个数	397	397
子模块电容/μF	8000	8000
桥臂电抗/mH	140	140

2.2 控制策略

MMC 换流站采用图 2 所示的功率/电压外环和电流内环的双环控制结构,其中电流内环控制器采用基于 dq 坐标系下的电流解耦控制,整流站 MMC1 外环控制器采用定直流电压和定无功功率控制,逆变站 MMC2 外环控制器采用定有功功率和定无功功率控制^[15]。

其中: U_{dref} 、 P_{ref} 、 Q_{ref} 和 U_{dc} 、 P 、 Q 分别为直流电压、有功功率、无功功率参考值和实测值; i_{dref} 、 i_{qref} 和 i_d 、 i_q 分别为有功电流、无功电流参考值和实测值; u_{dref} 、 u_{qref} 、 u_d 、 u_q 分别为交流网侧电压 dq 轴分量的参考值和实测值; u_{dmj_ref} 为 $j(j=a, b, c)$ 相上、下桥臂

差模电压参考值。各变量未根据整流站或逆变站进行区分,本文中若无特殊声明,均指逆变站。

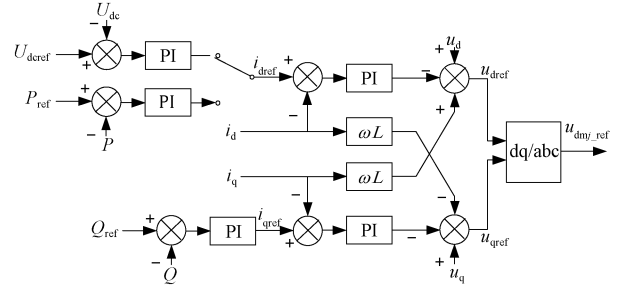


图 2 MMC 换流站正序双环控制器结构

Fig.2 Positive-sequence double-loop controller of MMC converter station

MMC 桥臂间二倍频的环流分量会增大桥臂电流的有效值,进而增大损耗,且会引起暂态过程中的不平衡与扰动。另外,柔直系统交流侧不对称故障产生的负序电流会导致桥臂过流,进而使得系统的故障穿越能力下降。为此,有研究在原有双环控制结构的基础上增加二倍频环流抑制与负序电流抑制^[16-18]。

以逆变站 MMC2 为例,得到其整体控制结构如图 3 所示。其中上标“+”、“-”分别代表相应电气量的正序、负序分量。正序电流控制部分与图 2 所示相同。二倍频环流抑制部分中, i_{pj} 、 i_{nj} 为 j 相上、下桥臂相应的桥臂电流, i_{sumj} 为 j 相内部电流, i_{2fd} 和 i_{2fq} 分别为二倍频环流的 dq 轴分量, i_{2fdref} 和 i_{2fqref} 分别为其参考值, u_{sumj} 为 i_{sumj} 在一个桥臂电抗上产生的压降,称为 j 相不平衡压降, u_{sumd_ref} 和 u_{sumq_ref} 分别为 u_{sumj} 的 dq 轴分量;为了抑制环流,取 $i_{2fdref} = i_{2fqref} = 0$,得到二倍频环流抑制附加控制信号 u_{sumj_ref} 。负序电流抑制部分中, i_{dref}^- 和 i_{qref}^- 为负序电流 dq 轴分量的参考值,为了抑制负序电流,取 $i_{dref}^- = i_{qref}^- = 0$ 。桥臂差模电压的正、负序参考值 $u_{dmj_ref}^+$ 与 $u_{dmj_ref}^-$ 相加,得到差模电压参考值 u_{dmj_ref} 。稳态运行时直流电流控制部分不接入控制器,直流电流由外环有功控制决定,MMC 上、下桥臂共模电压参考值 u_{cmj_ref} 满足:

$$u_{cmj_ref} = \frac{1}{2}U_{dc} - u_{sumj_ref} \quad (1)$$

进而得到各桥臂参考电压 u_{pj_ref} 、 u_{nj_ref} :

$$\begin{cases} u_{pj_ref} = u_{cmj_ref} - u_{dmj_ref} \\ u_{nj_ref} = u_{cmj_ref} + u_{dmj_ref} \end{cases} \quad (2)$$

获得桥臂电压参考值后,经过载波调制生成相应的触发脉冲,控制各子模块的开通与关断。

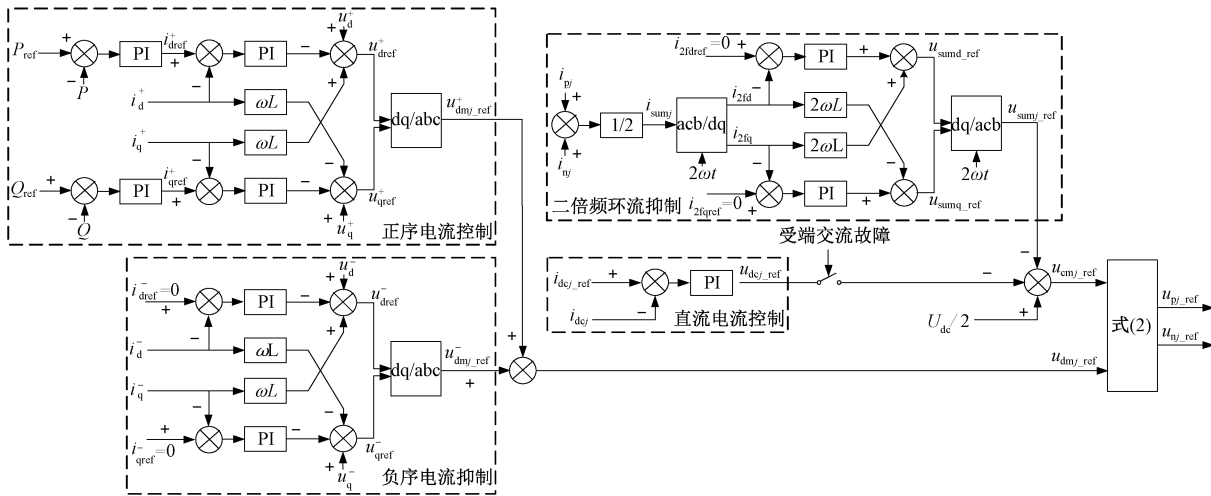


图 3 逆变器 MMC2 整体控制器结构
Fig.3 Control strategy diagram of inverter MMC2

3 柔直系统受端交流故障稳流控制

3.1 交流电流限幅控制

逆变器 MMC2 采用定有功功率和定无功功率控制,通过电流解耦控制,有功电流 i_d 与无功电流 i_q 分别控制受端逆变器有功功率 P 与无功功率 Q 维持恒定。当交流侧发生故障电压跌落,定功率控制下 i_{dref}^+ 、 i_{qref}^+ 会随之增大,合成参考电流矢量可能导致交流侧过流。取交流电流限幅值 I_{lim} 为额定交流电流,即 1.0pu,在 dq 平面内,若 i_{dref}^+ 、 i_{qref}^+ 合成的电流矢量超出以 I_{lim} 为半径的圆的范围,为发出足够的无功以支撑受端交流电压,本文中优先提供无功电流,之后在限幅范围内提供部分有功电流,得到限幅后的有功电流、无功电流正序分量参考值 i_{dref}^{+*} 、 i_{qref}^{+*} ,从而实现故障稳流控制,将交流侧故障电流稳定在额定值。 i_{dref}^{+*} 、 i_{qref}^{+*} 满足式(3):

$$\begin{cases} i_{dref}^{+*} = \min\{i_{dref}^+, \sqrt{I_{lim}^2 - (i_{qref}^{+*})^2}\} \\ i_{qref}^{+*} = \min\{i_{qref}^+, I_{lim}\} \end{cases} \quad (3)$$

柔直系统受端交流电流限幅控制示意图如图 4 所示,其中虚线圆半径为 I_{lim} 。

3.2 直流电压前馈控制

整流站 MMC1 有功功率 P_1 满足式(4):

$$P_1 = \frac{3}{2}(u_{dr}i_{dr} + u_{qr}i_{qr}) \quad (4)$$

式中, u_{dr} 、 u_{qr} 、 i_{dr} 、 i_{qr} 分别为整流侧交流电压、电流的 dq 轴分量。

为提高受端发生交流故障时的故障响应速度,

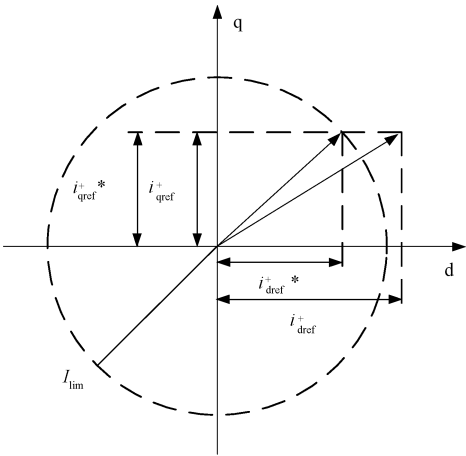


图 4 受端交流电流限幅控制
Fig.4 AC current amplitude control of receiving end

减小直流电压过压,可将受端有功功率 P 传输至整流站,作为整流站有功功率 P_1 的前馈部分代入式(4),计算得到的 i_{dr} 作为整流站 i_{dref} 的前馈部分。由于加入了负序电流抑制,可只考虑正序有功分量,在图 2 所示控制的基础上加入前馈控制,得到新的直流电压控制框图如图 5 所示。

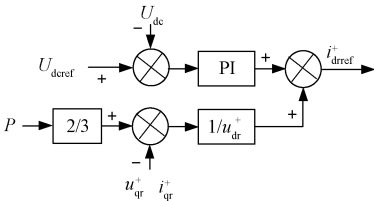


图 5 整流站直流电压前馈控制
Fig.5 DC voltage feedforward control of rectifier MMC1

3.3 故障及恢复期间直流电流控制

MMC 直流侧电流 I_{dc} 满足:

$$I_{dc} = i_{dea} + i_{deb} + i_{dce} \quad (5)$$

式中, i_{dej} 为 j 相直流电流。不考虑桥臂二倍频环流,则 i_{dej} 满足:

$$i_{dej} = \frac{i_{pj} + i_{nj}}{2} \quad (6)$$

为解决受端交流故障与恢复期间的直流电流波动,以及故障恢复时的直流电流过冲问题,本文在故障与恢复期间加入直流电流控制,给定三相的直流电流参考值 i_{dej_ref} 。直流电流控制与交流电流控制之间存在耦合关系,因此需与逆变站外环有功控制相互配合。根据文献[19]中的分析结果, i_{dej_ref} 满足式(7):

$$i_{dej_ref} = \frac{U_m^+ I_m \cos(\varphi_j^+ - \theta) + U_m^- I_m \cos(\varphi_j^- - \theta)}{2U_{dc}} \quad (7)$$

式中, U_m^+ 、 U_m^- 分别为受端交流电压正、负序分量的幅值; φ_j^+ 、 φ_j^- 分别为 j 相交流电压正、负序分量的相位; I_m 为受端交流电流幅值; θ 为功率因数角(以电流超前电压为正)。

在直流电压前馈控制的作用下,故障期间直流电压较为稳定,可通过控制桥臂共模电压改变桥臂电抗上的压降,进而控制每相的直流电流。由此可得到式(8)所示的 PI 控制器进行直流电流控制。

$$u_{dej_ref} = k_p(i_{dej_ref} - i_{dej}) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t (i_{dej_ref} - i_{dej}) d\tau \quad (8)$$

u_{dej_ref} 即为图 3 所示 j 相直流电流附加控制信号,与环流抑制控制器输出信号叠加,得到加入直流电流控制的桥臂共模电压参考值:

$$u_{cmj_ref} = \frac{1}{2}U_{dc} - u_{sumj_ref} - u_{dej_ref} \quad (9)$$

故障切除后,为减小直流电流过冲,对有功功率进行缓变控制,即逆变站有功功率参考值 P_{ref} 由故障切除瞬间的受端有功功率逐渐增大至额定值。为帮助受端交流电压恢复,此过程中可在逆变站额定容量 S 允许范围内尽量增大无功功率,则逆变站无功功率参考值 Q_{ref} 为:

$$Q_{ref} = \sqrt{S^2 - P_{ref}^2} \quad (10)$$

故障恢复期间直流电流参考值 i_{dej_ref} 为:

$$i_{dej_ref} = \frac{P_{ref}}{3U_{dcref}} \quad (11)$$

则 i_{dej_ref} 逐渐增大至故障前的稳态电流值 $I_{dc}/3$ 。直流电流稳定在额定值附近后,逐渐减小直流电流附加控制信号 u_{dej_ref} 至 0,直流电流不再直接受控,而是由直流电压与有功功率共同决定。

3.4 换流站暂时性闭锁策略

由于实际柔直工程中的控制保护系统存在信号采样延时与极控、阀控延时,若发生近端严重交流故障,前述交流电流限幅等故障穿越控制未能及时发挥作用,柔直系统交流端口迅速上升的故障电流可能导致换流站桥臂电流过大,超出器件承受范围,因此需对换流站进行闭锁保护,关断故障电流。针对渝鄂背靠背柔性直流工程,本文在交流故障换流站采用暂时性闭锁策略,即在柔直系统在交流系统故障闭锁后,且交流系统故障尚未恢复前的较短时间内,迅速将换流站解锁,并控制柔直系统交流电流参考(限幅)值从 0 逐渐增大至额定值。具体实施方式如下:

(1)任一桥臂电流瞬时值超过暂时性闭锁保护定值 2100A,整流站与逆变站同时闭锁,并将电流内环控制中各 PI 环节的积分部分清零;

(2)闭锁 20ms 后,整流站与逆变站同时解锁,在之后的 40ms 内将 i_{dref} 、 i_{qref} 合成的电流矢量限幅由 0 逐渐增大至 1.0pu,尝试进行稳流控制,加入直流电流控制环节;

(3)当受端正序电压大于 0.9pu 时,判断交流故障已经切除,将功率外环控制中各 PI 环节的积分部分清零,逐渐增大有功功率参考值 P_{ref} ,由故障切除瞬间的有功测量值经 50ms 增大至额定值,直流电流也恢复至额定水平,此过程中无功功率参考值 Q_{ref} 按式(10)相应变化;

(4)故障切除后 50ms,开始逐渐减小直流电流附加控制信号 u_{dej_ref} ,经 80ms 减小至 0。

4 仿真分析与验证

为验证本文提出的柔直系统受端交流故障稳流控制的有效性,在 PSCAD/EMTDC 仿真平台中搭建了图 1 所示的柔直输电系统,逆变站吸收无功 520MVar,其余主要参数见表 1。

4.1 无延时控保系统仿真分析

柔直系统采用完全理想的控制和保护系统,不存在信号采样延时与极控、阀控延时。不加入 3.2、3.3 节所述的直流电压前馈控制与直流电流控制,系统稳定运行至 0.6s 时,受端交流系统发生三相短

路故障,交流电压跌落至额定值的 20%,故障持续 100ms 后切除,仿真结果如图 6 所示。由仿真结果可以看出,故障发生后直流电压与桥臂电容电压(桥臂内所有模块电容电压之和)升高,0.638s 时桥臂电容电压达到最大值 1049kV,0.630s 时直流电压达到最大值 908kV,之后缓慢降低,在故障切除后跌落至额定值以下;故障与恢复期间直流电流波动明显,0.723s 时达到最大值 2.22kA;0.621s 时交流电流达到最大值 3.01kA,之后被限制在额定值范围内,实现交流稳流控制;0.622s 时桥臂电流达到最大值 1.89kA,在器件承受范围内,可实现交流故障穿越。

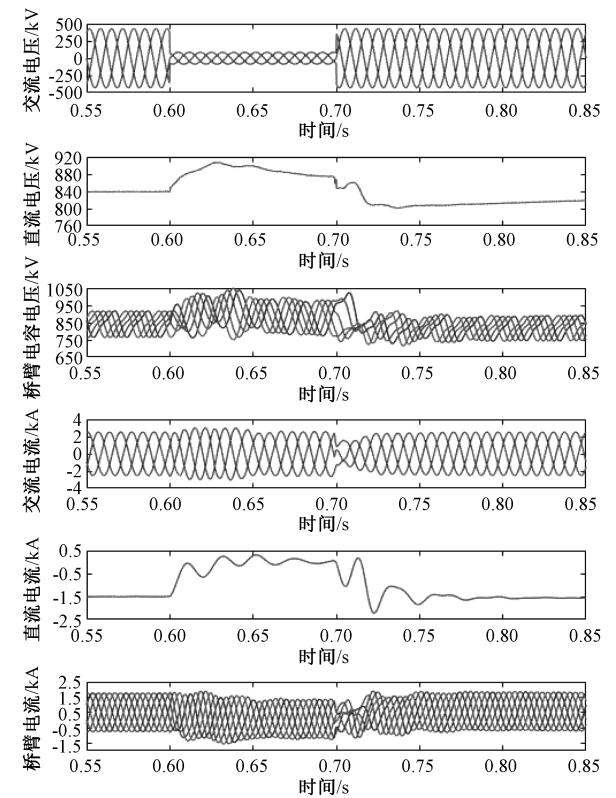


图 6 受端三相短路故障响应

Fig.6 System response under three phase short circuit fault at receiving end

4.2 考虑实际延时控保系统仿真分析

实际工程中存在信号采样延时与极控、阀控延时,其总和约为 550 μ s,在前述仿真基础上加入延时,仿真结果如图 7 所示。由仿真结果可以看出,故障发生后直流电压与桥臂电容电压升高,0.626s 时直流电压达到最大值 910kV,0.638s 时桥臂电容电压达到最大值 1045kV;直流电流波动较大,0.723s 时达到最大值 2.05kA;由于存在采样与控制延时,

故障发生后桥臂电流与交流电流迅速上升,故障后经过 600 μ s,交流电流达到最大值 3.71kA,同时桥臂电流达到最大值 2.36kA,超出闭锁保护定值。

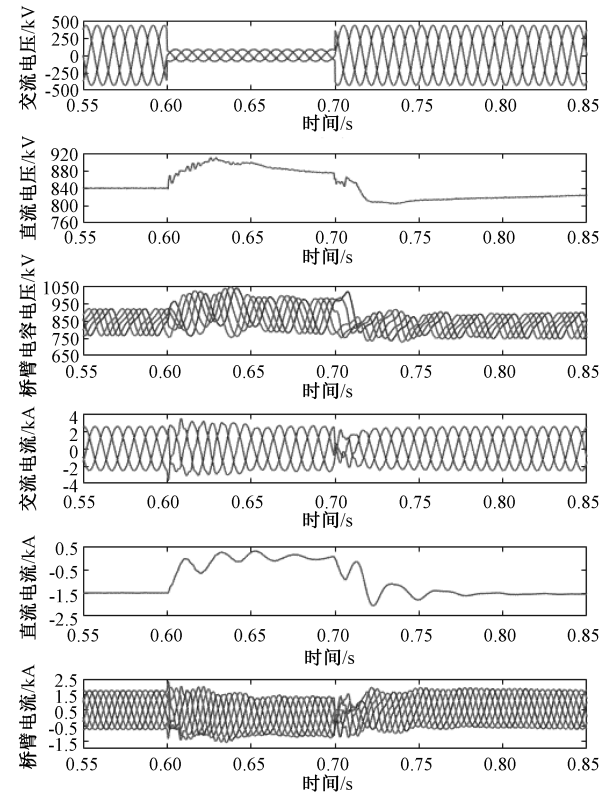


图 7 考虑延时的受端三相短路故障响应

Fig.7 System response under three phase short circuit fault at receiving end with system delay

为验证本文提出的稳流控制方法的有效性,在上述仿真模型基础上加入直流电压前馈控制与直流电流控制,仿真结果如图 8 所示。由仿真结果可以看出,故障发生后直流电压升高,0.601s 时直流电压达到最大值 891kV;故障切除后桥臂电容电压有所上升,0.745s 时达到最大值 986kV;故障期间直流电流峰-峰值为 0.56kA,有效减小了直流电流波动,故障切除后直流电流几乎无波动,0.840s 时达到最大值 1.51kA,基本消除了直流电流过冲;故障发生后桥臂电流与交流电流迅速上升,故障后经过 600 μ s,桥臂电流达到最大值 2.33kA,同时交流电流达到最大值 3.71kA。

通过对比图 7 与图 8 可以发现,采用本文提出的直流电流控制方法,可有效减小故障期间及故障切除后的直流电流波动以及故障恢复过程中的直流电流过冲,并在一定程度上减小了直流电压与桥臂电容电压峰值。

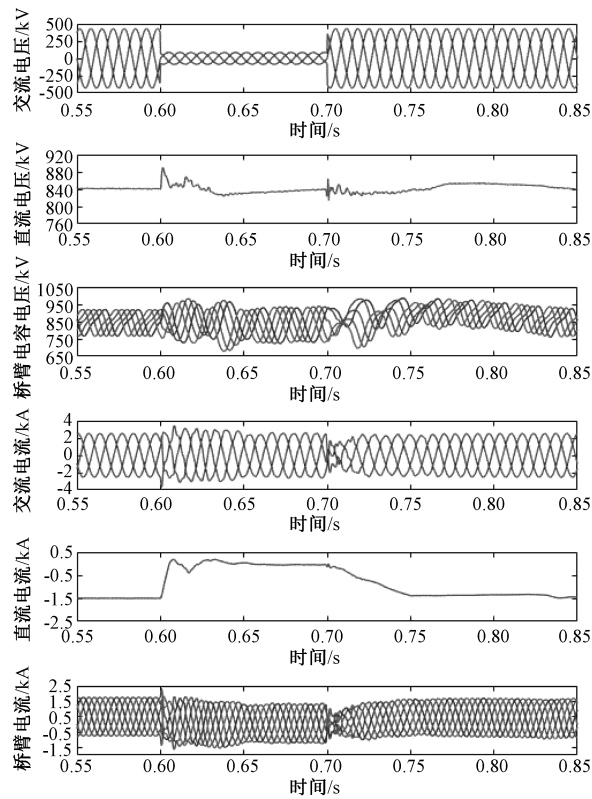


图 8 加入直流控制的受端三相短路故障响应

Fig.8 System response under three phase short circuit fault at receiving end with DC control

为验证本文提出的暂时性闭锁控制策略的有效性,在加入采样与控制延时的仿真模型基础上,实施暂时性闭锁,仿真结果如图 9 所示。由仿真结果可以看出,故障发生后桥臂电流迅速上升,经过 $300\mu\text{s}$ 后达到暂时性闭锁保护定值 2.1kA ,换流站闭锁,此时桥臂电抗通过模块电容放电,导致直流电压出现尖峰,峰值约为 1095kV ,此时交流电流也达到最大值 3.27kA ;闭锁 20ms 后,换流站解锁,解锁后的 40ms 内交流电流由 0 逐渐增大至额定值,之后保持稳定;故障切除后桥臂电容电压有所上升, 0.745s 时达到最大值 981kV ;直流电流波动基本消除。

为验证本文提出的柔直系统受端交流故障稳流控制对于交流非对称故障的有效性,设计了两组仿真进行对比。考虑系统延时,不加入直流电压前馈控制与直流电流控制,系统稳定运行至 0.6s 时,受端交流系统发生单相短路故障,A 相交流电压跌落至额定值的 20% ,故障持续 100ms 后切除,仿真结果如图 10 所示。由仿真结果可以看出,故障发生后直流电压与桥臂电容电压升高, 0.615s 时桥臂电容电压达到最大值 982kV , 0.631s 时直流电压达到最

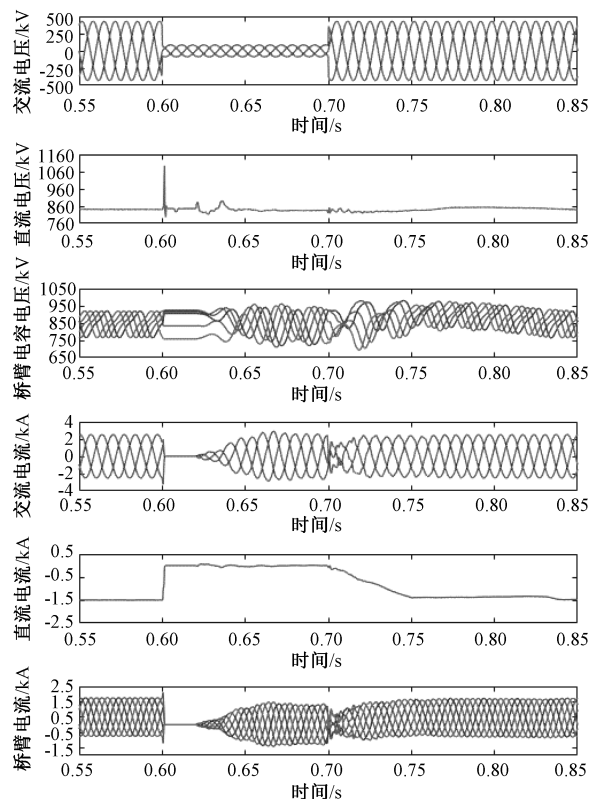


图 9 暂时性闭锁策略下受端三相短路故障响应

Fig.9 System response under three phase short circuit fault at receiving end with temporary blocking strategy

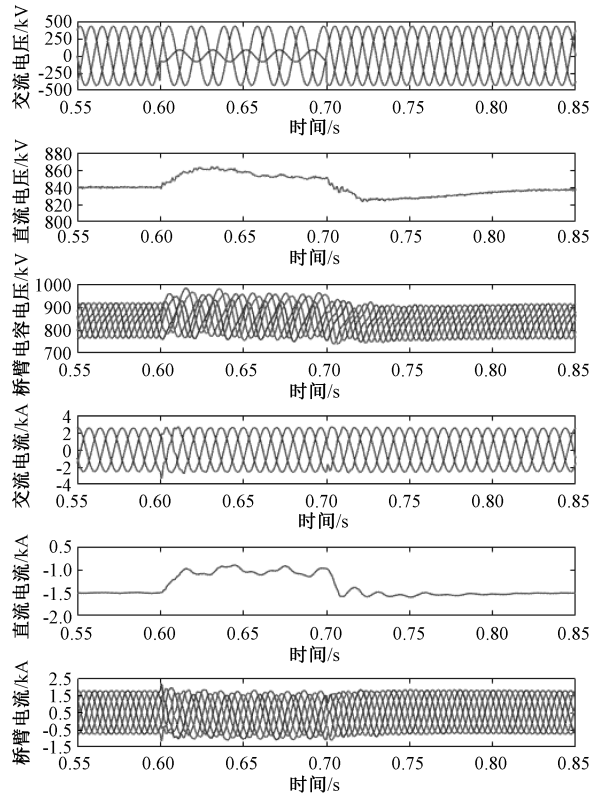


图 10 考虑延时的受端单相短路故障响应

Fig.10 System response under single phase short circuit fault at receiving end with system delay

大值 864kV,之后缓慢降低,在故障切除后跌落至额定值以下;故障恢复期间直流电流出现波动,0.709s 时达到最大值 1.58kA;故障发生后桥臂电流与交流电流迅速上升,故障后经过 600 μ s,桥臂电流达到最大值 2.17kA,同时交流电流达到最大值 3.32kA。

在上述仿真基础上加入直流电压前馈控制与直流电流控制,仿真结果如图 11 所示。由仿真结果可以看出,故障发生后直流电压迅速升高,达到最大值 854kV;桥臂电容电压也有所上升,0.615s 时达到最大值 965kV;故障切除后直流电流几乎无波动,0.819s 时达到最大值 1.51kA,基本消除了直流电流过冲;故障发生后桥臂电流与交流电流迅速上升,故障后经过 600 μ s,桥臂电流达到最大值 2.11kA,同时交流电流达到最大值 3.32kA。

以上 6 种不同仿真条件与控制策略下的仿真结果,各电气量的故障峰值与过载率如表 2 所示。由表 2 可以看出,对于交流对称故障与非对称故障,使用本文提出的稳流控制方法均可有效减小各电气量故障峰值,降低器件损坏风险,提高系统故障穿越能力;本文提出的暂时性闭锁策略也可成功限制桥臂电流峰值,防止功率器件损坏。

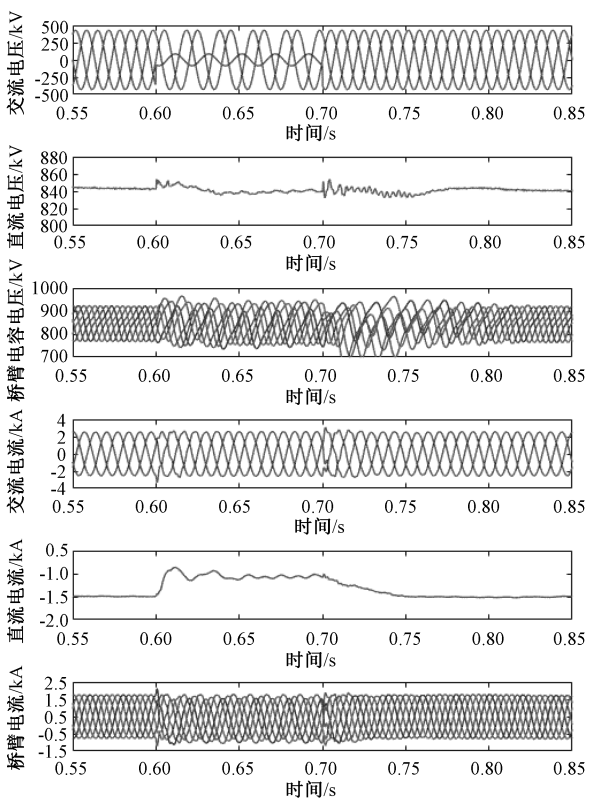


图 11 加入直流控制的受端单相短路故障响应
Fig.11 System response under three phase short circuit fault at receiving end with DC control

表 2 不同控制策略下各电气量故障峰值与过载率							
Tab.2 Peak values and overload rates under AC fault with different control strategy							
电气量	稳态峰值	三相故障 无延时	三相故障 有延时	三相故障 稳流控制	三相故障 暂时性闭锁	单相故障 有延时	单相故障 稳流控制
直流电压/kV	840	908(1+8.1%)	910(1+8.3%)	891(1+6.1%)	1095(1+30.4%)	864(1+2.9%)	854(1+1.7%)
模块电容电压/kV	913	1049(1+14.9%)	1045(1+14.5%)	986(1+8.0%)	981(1+7.4%)	982(1+7.6%)	965(1+5.7%)
交流电流/kA	2.42	3.01(1+24.4%)	3.71(1+53.3%)	3.71(1+53.3%)	3.27(1+35.1%)	3.32(1+37.2%)	3.32(1+37.2%)
直流电流/kA	1.50	2.22(1+48.0%)	2.05(1+36.7%)	1.51(1+0.7%)	1.51(1+0.7%)	1.58(1+5.3%)	1.51(1+0.7%)
桥臂电流/kA	1.71	1.89(1+10.5%)	2.36(1+38.0%)	2.33(1+36.3%)	2.10(1+22.8%)	2.17(1+26.9%)	2.11(1+23.4%)

5 结论

本文结合渝鄂背靠背柔性直流输电工程,考虑实际工程中存在的采样与控制延时,提出了受端交流故障期间的稳流控制策略,包括交流电流限幅控制,直流电压前馈控制,直流电流控制,以及发生严重故障时的换流站暂时性闭锁策略,可实现故障期间受端交流稳流,抑制直流电流波动,减小各电气量故障峰值,降低器件损坏风险,提高系统可靠性。在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建了渝鄂柔直工程的仿真模型,验证了所设计故障穿越策略的有效性。

参考文献 (References):

[1] 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.

[2] 马成廉, 潘文明, 姚天亮, 等 (Ma Chenglian, Pan Wenming, Yao Tianliang, et al.). VSC-HVDC 在交流电网非故障时的控制策略研究 (Research on control strategy of VSC-HVDC in AC power grid) [J]. 东北电力大学学报 (Journal of Northeast Dianli University), 2015, 35 (6): 26-32.

- [3] 徐政,陈海荣 (Xu Zheng, Chen Hairong). 电压源换流器型直流输电技术综述 (Review and applications of VSC-HVDC) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2007, 33 (1): 1-10.
- [4] 王杉,谢利理,王海宇 (Wang Shan, Xie Lili, Wang Haiyu). MMC-HVDC 简化有限集快速模型预测控制研究 (Study of control strategy for MMC-HVDC system based on simplified finite set fast model predictive control) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (6): 16-26.
- [5] 徐友平,张珂,潘晓杰,等 (Xu Youping, Zhang Ke, Pan Xiaojie, et al.). 渝鄂背靠背柔性直流附加阻尼控制策略研究 (Damping control based on back to back VSC-HVDC connecting Chongqing and Hubei Power Grid) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2016, 44 (18): 163-169.
- [6] 朱琳,寇龙泽,刘栋 (Zhu Lin, Kou Longze, Liu Dong). 渝鄂柔性直流输电交流动态特性及控制保护策略研究 (Research on transient characteristics of AC-DC system and control and protection strategy for Chonging-Hubei projection) [J]. 全球能源互联网 (Journal of Global Energy Interconnection), 2018, 1 (4): 454-460.
- [7] 朱琳,贺之渊,吴学光,等 (Zhu Lin, He Zhiyuan, Wu Xueguang, et al.). 渝鄂背靠背柔性直流附加控制对系统稳定性的影响 (Influence of additional control strategy of Back-to-Back VSC-HVDC on system stability) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2018, 42 (8): 2519-2527.
- [8] Adam G P, Ahmed K H, Finney S J, et al. AC fault ride-through capability of a VSC-HVDC transmission systems [A]. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition [C]. Atlanta, USA, 2010. 3739-3745.
- [9] 陈海荣,徐政 (Chen Hairong, Xu Zheng). 适用于 VSC-MTDC 系统的直流电压控制策略 (A novel DC voltage control strategy for VSC based multi-terminal HVDC system) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2006, 30 (19): 28-33.
- [10] 李永胜,韦正元,宋雪芹,等 (Li Yongsheng, Wei Zhengyuan, Song Xueqin, et al.). 柔性直流与交流并列输电换流器交流故障穿越 (HVDC flexible converter AC fault ride-through with AC parallel transmission) [J]. 陕西电力 (Shanxi Electric Power), 2012, 40 (4): 75-78.
- [11] 黄伟煌,李明,刘涛,等 (Huang Weihuang, Li Ming, Liu Tao, et al.). 柔性直流输电受端交流侧故障下的控制策略 (Control strategy for VSC-HVDC under AC system fault of receiving end) [J]. 南方电网技术 (Southern Power System Technology), 2015, 9 (5): 27-31.
- [12] Howell S, Filizadeh S, Gole A M. Unidirectional HVDC topology with DC fault ride-through capability [J]. Canadian Journal of Electrical & Computer Engineering, 2017, 40 (1): 41-49.
- [13] Chen X, Irwin G, Woodford D, et al. Reactive power control in MMC HVDC system during ac fault [A]. 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission [C]. Beijing, China, 2016.
- [14] 余锐,肖超,陈愚,等 (Yu Rui, Xiao Chao, Chen Yu, et al.). 柔性直流馈入下交流输电线路单端故障测距分析 (Performance analysis of single-terminal fault location for transmission lines in an HVDC/AC interconnected power system) [J]. 重庆大学学报 (Journal of Chongqing University), 2017, 40 (9): 51-60.
- [15] Jovcic D, Lamont L, Abbott K. Control system design for VSC transmission [J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77 (7): 721-729.
- [16] Amirnaser H, Reza I. Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.
- [17] 屠卿瑞,徐政,管敏渊,等 (Tu Qingrui, Xu Zheng, Guan Minyuan, et al.). 模块化多电平换流器环流抑制控制器设计 (Design of circulating current suppressing controllers for modular multilevel converter) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2010, 34 (18): 57-61, 83.
- [18] 吕泳庆,邓富金,王青松,等 (Lv Yongqing, Deng Fujin, Wang Qingsong, et al.). 基于单相矢量控制的 MMC 环流抑制策略 (Circulating current elimination strategy for MMCs based on single phase vector control) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (6): 18-24.
- [19] 马世强,余利霞,郑连清 (Ma Shiqiang, Yu Lixia, Zheng Lianqing). MMC-HVDC 交流侧不对称故障特性分析与保护策略 (Characteristics analysis of MMC-HVDC AC asymmetric fault and protection strategy) [J]. 华北电力大学学报 (Journal of North China Electric Power University), 2015, 42 (6): 35-42, 63.

Research of AC fault ride-through strategy for Chongqing-Hubei
VSC-HVDC back-to-back project

XU Rui-lin¹, LI Ming-rui², ZHANG Lian-qiang³, ZHU Cheng-yi¹,
WEI Ying-dong², HOU Ling-xi²

- (1. Electric Power Research Institute State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China;
- 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
- 3. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: AC faults of VSC-HVDC bring system security and stability problems. This paper focuses on AC fault at receiving end of Chongqing-Hubei VSC-HVDC. Sample and control delay of the project is considered. An AC fault ride-through strategy is proposed, including AC current amplitude control, DC voltage feedforward control, DC current control and temporary blocking strategy under serious fault. The proposed strategy reduces overcurrent and overvoltage of both AC and DC side, improves fault ride-through ability of the VSC-HVDC system. The risk of device damage is reduced. Simulation results in PSCAD/EMTDC environment demonstrate the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: Chongqing-Hubei VSC-HVDC; additional control; AC fault ride-through; temporary blocking