

考虑故障阀臂封锁条件下的 VSC-HVDC 换流器故障诊断算法

孙晓云¹, 高鑫², 同向前³

(1. 西安科技大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 国家电网公司西北分部, 陕西 西安 710048;

3. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要:针对两电平柔性直流输电(VSC-HVDC)系统换流器内部常见的 IGBT 阀器件短路失效、桥臂直通、交流侧单相接地、交流侧两相短路、直流单极接地这 5 类贯穿故障,研究了换流器故障保护与诊断的协调配合方案,分析了保护闭锁条件下系统直流电压及交流电流的变化规律,据此提出了利用闭锁时刻的直流电压及闭锁后 2 个周期的三相交流电流作为特征信号进行换流器故障分类与定位的诊断方法,并确定了用于区分故障类型的电压、电流诊断阈值。对换流器严重贯穿故障进行仿真,利用 PSCAD/EMTDC 模型对所提出的诊断方法进行了验证,结果表明该方法不仅能可靠识别故障类型,还能准确定位故障位置,可用于故障阀臂闭锁条件下 VSC-HVDC 换流器的故障诊断。

关键词:电压源换流器;高压直流输电;故障保护;故障定位;阀臂封锁

中图分类号:TM 46;TM 721.1

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.019

0 引言

柔性直流输电(VSC-HVDC)系统是应绿色电网、新能源发电并网要求发展起来的一种新型直流输电技术,现已广泛应用到风力发电、孤岛送电、海洋发电等领域^[1-3]。电压源换流器作为 VSC-HVDC 系统的核心,主要实现交流电与直流电的变换,但其过压过流能力差,容易发生故障并且维护困难。因此,有必要研究电压源换流器内部故障形式、制定保护策略、准确识别故障类型及位置,从而为装置的安全可靠运行与故障后的快速恢复提供有力保障^[4]。

文献[5-7]仿真分析了基于两电平电压源换流器的 VSC-HVDC 系统的内部故障,提出了相应的保护策略文献;文献[8-9]设计了 VSC-HVDC 的控制系统,通过合理配置控制策略来提高系统故障情况的不间断运行能力并实现保护功能。文献[10-11]探讨了基于两电平换流器的 VSC-HVDC 系统的故障运行特性,结合信号处理和模式识别的思想给出了换流器故障诊断方法,但这些方法需要提取较长

时间的诊断信号,若换流器出现交流单相接地等瞬间产生严重过流的贯穿故障,会立即启动保护使换流器退出运行导致无法提取到信号进行换流器故障诊断,因此非常有必要结合故障保护策略研究解决后果严重的换流器故障诊断问题。

针对两电平 VSC-HVDC 系统中电压源换流器可能出现的常见严重贯穿故障,包括 IGBT 阀器件短路失效、桥臂直通、交流侧单相接地、交流侧两相短路、直流单极接地共 5 类情况,本文研究换流器严重故障下的故障保护和故障诊断的协调配合方案,分析证明换流器故障闭锁保护后的系统直流电压及交流电流的变化规律,在此基础上提出一种可用于故障阀臂封锁保护条件下的故障诊断方法来识别换流器严重故障类型及位置。

1 换流器严重故障下故障保护与诊断协调配合

VSC-HVDC 系统可能发生故障的部位以及故障的类型有许多,换流器内部常见 5 种严重贯穿故障类型^[4]分别是 F_1 ——IGBT 短路失效、 F_2 ——换流器桥臂直通故障、 F_3 ——交流侧单相接地故障、 F_4 ——交流侧两相短路故障、 F_5 ——直流侧单极接地故障,换流器故障位置如图 1 所示。

上述 5 类故障的共同特点是换流器通过故障点迅速形成放电通路,换流器直流电压瞬间下降且交直流电流均出现了严重过流^[4],这些故障是永久性的,无论采用何种控制方式来抑制故障都不能达到理想效果^[12]。为了保护昂贵的电力电子装置、保证电网安全运行及避免故障影响范围扩大,需要制定快速可靠的故障保护策略。

换流器发生严重故障时需依据“先保护,后诊

收稿日期:2018-01-21;修回日期:2018-07-24

基金项目:陕西省自然科学基金研究计划项目(2017JM5065);陕西省教育厅科研计划项目(15JK1477);西安科技大学博士启动金资助项目(2017QDJ006);2015 年陕西本科高校省级精品资源共享课程资助项目(94);2015 年度陕西本科高校省级教学团队项目(47)

Project supported by the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (2017JM5065) and Shaanxi Provincial Education Department Research Program (15JK1477), Xi'an University of Science and Technology Initial Funding (2017QDJ006), 2015 Provincial High Quality Resources Sharing Course in Shaanxi University (94) and 2015 Provincial Teaching Team of Shaanxi University (47)

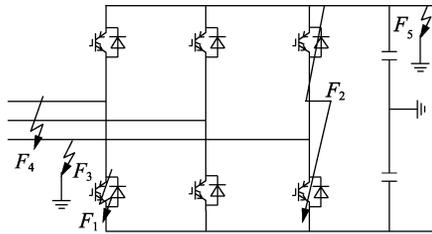


图 1 电压源换流器的常见严重故障

Fig.1 Common serious faults of VSC

断”的原则制定故障保护策略和诊断方案。换流器故障保护 CPU 模块根据检测的电压、电流等电气量辨识故障严重程度,若故障严重则启动换流器保护策略直接闭锁故障换流器的全部 IGBT 器件,并实施交流系统跳闸动作退出运行^[2];此外,可以保持另一侧换流器运行于定直流电压的静止同步补偿器(STATCOM)状态来提高经济性;换流器闭锁保护后故障保护 CPU 模块可立即发送“故障诊断指令”到诊断模块 CPU,启动诊断模块工作来识别贯穿故障类型和位置,换流器故障诊断模块与故障保护模块需要协调配合工作,两者协调工作关系如图 2 所示。

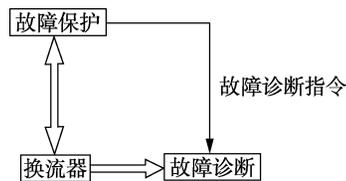


图 2 换流器故障诊断与保护关系

Fig.2 Relationship of VSC fault diagnosis and protection

故障换流器实施闭锁并跳闸,闭锁保护为电气动作,几十纳秒完成;断路器跳闸是机械动作一般需要 3 个工频周期(60 ms)完成^[13],交流高压断路器跳闸时间包含保护逻辑判断时间、固有分闸时间和灭弧时间^[14]。以 110 kV 的 SF₆ 断路器为例,其灭弧时间最多 18 ms,所以在断路器的逻辑判断和固有分闸时间(40 ms)内,故障换流器闭锁而断路器触头没有分离,交流电源依然供电,期间故障换流器电压、电流信号能够反映故障换流器电路拓扑信息,本文

的研究思路就是以这段时间的电压、电流作为故障诊断信号,对其提取故障特征参数后识别故障类型及位置。

2 故障阀臂封锁条件下的换流器故障诊断算法

2.1 换流器阀臂保护闭锁后的系统运行特性

基于 PSCAD 仿真软件建立两电平 VSC-HVDC 系统,系统拓扑图及各物理量参考方向如图 3 所示,各物理量含义及系统仿真参数如附录 A 所示。

为了模仿换流器严重故障保护闭锁且断路器跳闸指令已发出但是触头没有分开交流系统依然供电,仿真送端 4 s 发生严重故障,10 μs 后闭锁送端全部 IGBT 器件,受端换流器自动工作于定直流电压的 STATCOM 状态。

2.1.1 F₁——IGBT 短路失效故障

图 4 给出 V_{T11} 短路闭锁保护波形。可以看出,瞬间直流电压 U_{dc1} 快速衰减到 0,闭锁后逐步调整到额定值;闭锁后送端电流 $i_{a1} < 0$ 、 $i_{b1} \geq 0$ 、 $i_{c1} \geq 0$;受端三相交流电流逐步趋于稳定。

闭锁后送端电源通过短路 IGBT 器件形成回路,电路拓扑如图 5 所示。由图可知,送端故障侧换流器反向二极管 V_{D14}、V_{D16} 不导通,没有出现 $i_{b1} < 0$ 、 $i_{c1} < 0$,本文采用反证法给出说明(推导过程见附录 B)。

由附录 B 的理论分析与图 4 所示送端换流器交流电流仿真波形可知:换流器上桥臂 IGBT 发生故障,故障所在相交流电流小于 0,非故障相电流均只有正半周;下桥臂发生故障时的三相电流方向则完全相反。

2.1.2 F₂——桥臂直通故障

图 6 给出了 4 s 时送端 a 相桥臂直通的保护闭锁波形。可以看出,瞬间直流电压 U_{dc1} 快速衰减到 0,闭锁后逐步调整到额定值;闭锁后电抗器存储电能迫使桥臂二极管导通,交流电流按原来的方向流动大约持续了 10 ms,待电抗器电能释放后送端交流

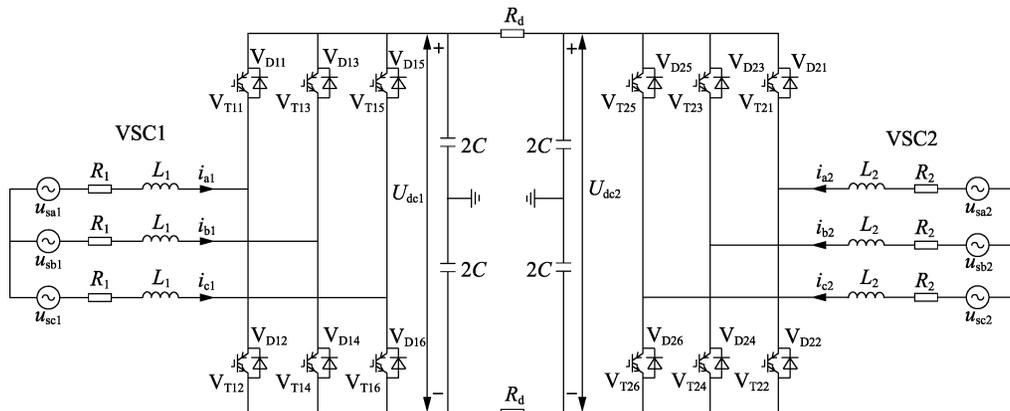


图 3 VSC-HVDC 系统拓扑图

Fig.3 Topology of VSC-HVDC system

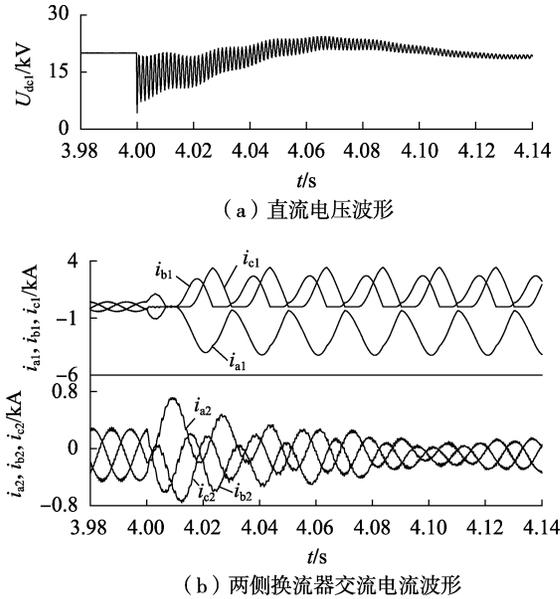


图 4 F_1 故障时仿真结果

Fig.4 Simulative results of F_1 fault

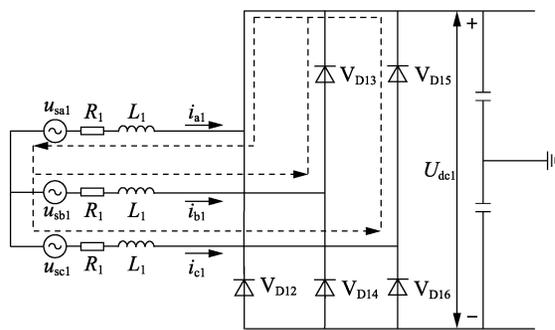


图 5 F_1 故障时送端换流器电流通路

Fig.5 Current path of sending VSC under F_1 fault

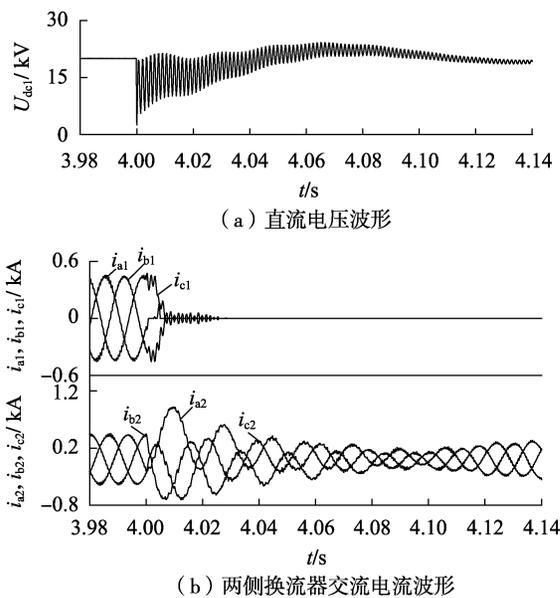


图 6 F_2 故障时仿真结果

Fig.6 Simulative results of F_2 fault

电流全为 0;闭锁保护后受端三相交流电流逐步趋于稳定。

2.1.3 F_3 ——交流侧单相接地故障

图 7 给出了送端出口 a 相接地故障闭锁仿真波形。可以看出,故障瞬间直流电压 U_{dc1} 快速衰减到 0 附近,闭锁后逐步调整到额定值;闭锁后送端电流 i_{a1} 正弦度较好,电流 i_{b1} 、 i_{c1} 严重畸变;闭锁保护后受端三相交流电流逐步趋于稳定。

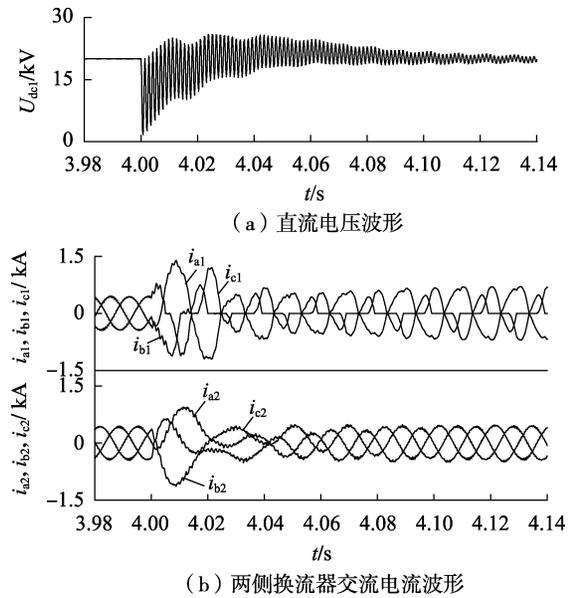


图 7 F_3 故障时仿真结果

Fig.7 Simulative results of F_3 fault

闭锁后送端交流电流回路如图 8 所示。类似于 F_1 故障,可以证明 V_{D13} 导通 ($i_{b1} > 0$) 需要满足条件 $\cos(\omega t - 60^\circ) < -\sqrt{2}/2$; V_{D14} 导通 ($i_{b1} < 0$) 需要满足条件 $\cos(\omega t - 60^\circ) > \sqrt{2}/2$ 。

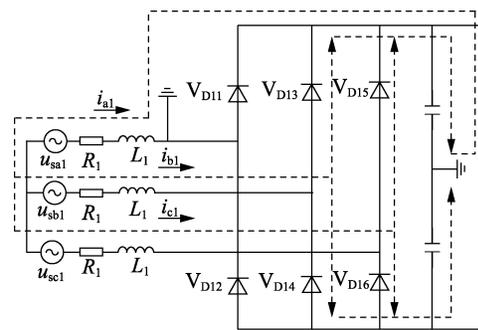


图 8 F_3 故障时送端换流器交流电流通路

Fig.8 Current path of sending VSC under F_3 fault

显然存在 $i_{b1} > 0$ 占 1/4 周期、 $i_{b1} < 0$ 也占 1/4 周期,且出现 $i_{b1} > 0$ 与 $i_{b1} < 0$ 的时间相差 1/2 周期。相似的分析也能推出 $i_{c1} > 0$ 、 $i_{c1} < 0$ 也各占 1/4 周期,且出现 $i_{c1} > 0$ 与 $i_{c1} < 0$ 的时间相差 1/2 周期。

上述理论分析与送端换流器的交流电流仿真波形形状基本一致,闭锁后故障相电流正弦度较好,非故障相电流约 1/2 周期为 0,1/4 周期大于 0,1/4 周

期小于0。

2.1.4 F_4 ——交流侧两相短路故障

图9给出了送端换流器出口a、b相两相短路闭锁保护仿真波形。可以看出,故障瞬间直流电压 U_{dc1} 快速衰减到0附近,闭锁后逐步调整到额定值;闭锁后送端电流 $i_{a1} = -i_{b1}, i_{c1} = 0$;闭锁后受端交流电流趋于稳定。

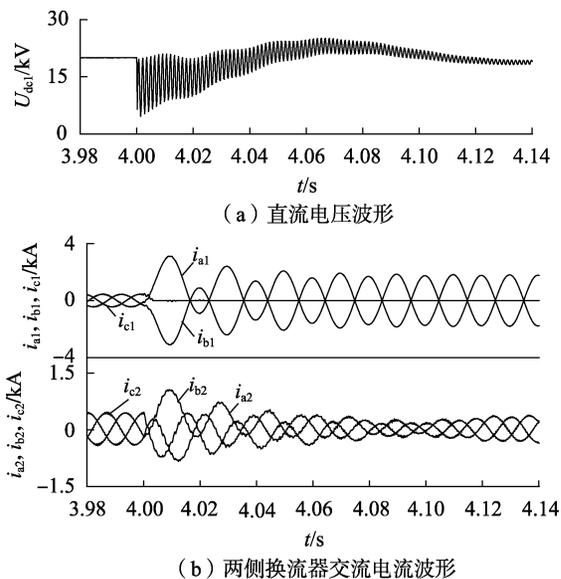


图9 F_4 故障时仿真结果

Fig.9 Simulative results of F_4 fault

送端换流器闭锁后反向并联二极管均没有导通,交流电源通过a、b相故障点形成通路。

2.1.5 F_5 ——直流侧单极接地故障

图10给出了送端直流侧正极出口接地闭锁仿真波形。可以看出,故障瞬间直流电压 U_{dc1} 快速衰减到额定值的一半,闭锁后逐步调整到额定值;闭锁

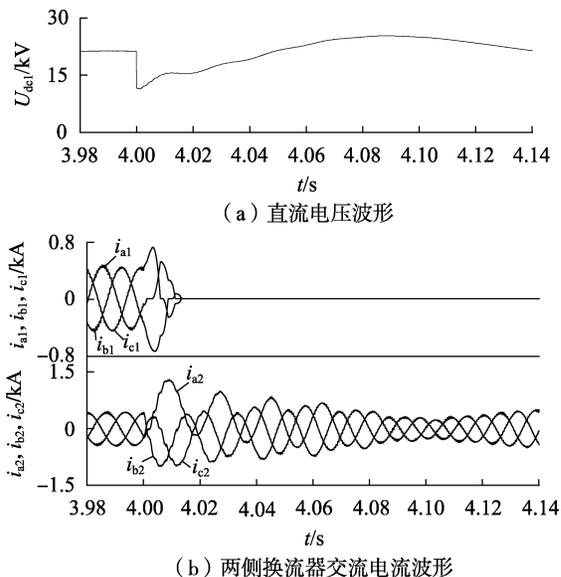


图10 F_5 故障时仿真结果

Fig.10 Simulative results of F_5 fault

后电抗器存储的电能迫使桥臂二极管导通,三相电流按照原来的方向流动,待电能释放后交流电流全部为0。

2.2 有阀臂闭锁保护的故障诊断算法

从上文故障仿真结果和理论分析得知,闭锁时刻的直流电压值、闭锁后到跳闸前的稳态三相交流电流波形具有各自的特点,能够反映故障换流器类型和位置。本文提出采集闭锁后至跳闸前的整个保护逻辑判断时间和断路器的固有分闸时间(40 ms)的三相交流电流作为故障诊断信号,不同故障种类下闭锁后故障信号特点非常明显,故障特征容易提取,预处理提取特征后用简单的层次化方法能够识别故障类型及位置。

要利用稳态三相交流电流作为故障诊断信号,可以只使用故障后2个周期信号(40 ms)后面的一个周期的信号。整个故障诊断过程如下。

a. 以故障换流器保护CPU发送的闭锁脉冲作为故障信号采集启动命令。

b. 采集故障换流器闭锁时刻直流电压 $U_{dc}(n)$ ($n=0, 0$ 为闭锁时刻)及闭锁后2个周期的三相交流电流 $i_a(n), i_b(n), i_c(n)$ ($n=1, 2, \dots, 2N$,其中 N 为一个周期的采样点数)。

c. 用式(1)预处理闭锁时刻直流电压,其中 U_{set} 为换流器正常运行直流电压值, $U_{dc}^*(0)$ 为标么化直流电压。

$$U_{dc}^*(0) = U_{dc}(0) / U_{set} \quad (1)$$

d. 用式(2)计算交流电流直流量 i_{x0} ($x=a, b, c$),用式(3)计算交流电流绝对平均值 $\overline{|i_x|}$ ($x=a, b, c$);定义 $\overline{|i|}_{\max} = \max(\overline{|i_a|}, \overline{|i_b|}, \overline{|i_c|})$,定义 $\overline{|i|}_{\min} = \min(\overline{|i_a|}, \overline{|i_b|}, \overline{|i_c|})$,定义 $i_{\max, \text{abs}} = \max(|i_{a0}|, |i_{b0}|, |i_{c0}|)$ 。

$$i_{x0} = \frac{1}{N} \sum_{n=N+1}^{2N} i_x(n) \quad x = a, b, c \quad (2)$$

$$\overline{|i_x|} = \frac{1}{N} \sum_{n=N+1}^{2N} |i_x(n)| \quad x = a, b, c \quad (3)$$

e. 以 $U_{dc}^*(0), \overline{|i|}_{\max}, \overline{|i|}_{\min}, i_{\max, \text{abs}}$ 作为故障诊断特征参数,用层次化方法识别故障类型及位置。

整个故障类型识别和定位流程如附录C中图C1所示,图中 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 为阈值参数。

2.3 诊断算法阈值的确定

依据故障信号波形特点理论分析,计算得到5类故障特征参数 $U_{dc}^*(0), \overline{|i|}_{\max}, \overline{|i|}_{\min}$ 如表1所示,表中 U_s 为换流器交流侧系统线电压, L 为换流器电抗器。

从图C1故障诊断过程看出,参数 δ_1 划分 F_1, F_3, F_4 故障及 F_2, F_5 故障2种情况。由表1可知, F_1, F_3, F_4 故障的 $\overline{|i|}_{\max}$ 分别为 $4\sqrt{1/6}U_s/(\pi\omega L), (2-\sqrt{2})U_s/(2\pi\omega L), \sqrt{2}U_s/(\pi\omega L), F_2, F_5$ 故障的 $\overline{|i|}_{\max}$ 均

表 1 5 类故障特征参数理论值

Tabel 1 Theoretical values of five types of fault characteristic parameters

故障类型	$U_{dc}^*(0)$	$\overline{ i }_{\max}$	$\overline{ i }_{\min}$
F_1	—	$4\sqrt{1/6}U_s/(\pi\omega L)$	$2\sqrt{1/6}U_s/(\pi\omega L)$
F_2	0	0	0
F_3	—	$(2-\sqrt{2})U_s/(2\pi\omega L)$	$(2-\sqrt{2})U_s/(4\pi\omega L)$
F_4	—	$\sqrt{2}U_s/(\pi\omega L)$	0
F_5	0.5	0	0

为 0,考虑到 0.1% 的测量误差,选取 δ_1 为 $0.01U_s \div (\omega L)$ 。

参数 δ_2 用于划分 F_2 故障和 F_5 故障。 F_2 故障的 $U_{dc}^*(0)$ 约为 0, F_5 故障的 $U_{dc}^*(0)$ 约为 0.5 p.u., 所以选取 δ_2 为 0.25。

参数 δ_3 划分 F_1 、 F_3 故障和 F_4 故障 2 种情况。由表 1 可知, F_1 、 F_3 故障的 $\overline{|i|}_{\min}$ 分别为 $2\sqrt{1/6}U_s \div (\pi\omega L)$ 、 $(2-\sqrt{2})U_s/(4\pi\omega L)$, 而 F_4 故障的 $\overline{|i|}_{\min}$ 为 0, 同样考虑到 0.1% 的测量误差, 选取 δ_3 为 $0.01U_s \div (\omega L)$ 。

3 故障诊断仿真及结果分析

按照附录 D 中的参数共仿真了送端 a 相上桥臂 V_{T11} 故障、送端桥臂直通故障、送端 a 相接地故障、送端 a 与 b 两相短路故障以及送端直流正极接地故障等 20 种情况。诊断时提取 4.01~4.051 s 信号但以 4.031~4.051 s 这一个周期的信号作为故障诊断所用信号,故障诊断所需特征参数如附录 E 中表 E1 所示。选取阈值 $\delta_1 = 0.01U_s/(\omega L) = 0.0318$ (kA)、 $\delta_2 = 0.25$ 、 $\delta_3 = 0.01U_s/(\omega L) = 0.0318$ (kA), 按照图 C1 的故障诊断流程进行诊断, 结果的正确率能达到 100%。

从表 E1 中的故障特征参数看出, 系统有功功率、无功功率、直流电压不改变诊断特征参数值, 不会影响诊断结果。由表 1 可以得出同样的结论, 因为故障换流器诊断特征仅取决于系统参数, 包括 U_s 和 L 。

此外阈值参数 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 的选取考虑到了系统参数变化的影响, 系统参数的变化没有影响故障诊断结果, 鉴于篇幅原因, 本文不再给出仿真结果。

4 不同运行工况下的故障诊断

上述仿真分析和算法验证均是送端换流器定有功控制、受端换流器定直流电压控制且送端故障为例进行研究, 对于其他运行工况下的诊断进行了研究分析和仿真验证, 并得出如下结论:

a. 若故障端为定有功控制, 非故障端为定直流电压控制, 整流、逆变的运行模式下故障端换流器故障三相交流电流波形形状都一样, 整流、逆变的运行模式不影响故障诊断;

b. 若故障端为定直流电压控制, 而非故障端为定有功控制, 故障端换流器闭锁并将非故障端换流器定有功模式变更为定直流电压 STATCOM 状态运行, 本文提出的故障诊断算法同样适用;

c. 本文提出的故障诊断算法是建立在单站闭锁的前提下, 换流器两站都闭锁情况下两侧换流器的三相交流电流均为 0, 交流电流不能反映故障拓扑信息, 本文故障诊断算法不适用。

5 结论

a. VSC-HVDC 系统换流器出现严重贯穿故障时需要及时实施保护策略, 换流器故障诊断模块应与故障保护模块协调配合工作来识别故障类型及位置;

b. 系统一侧换流器故障闭锁保护且另一侧换流器工作于定直流电压 STATCOM 状态, 其故障换流器闭锁保护至跳闸前时间段内的三相暂态电流波形特征直接反映了故障换流器电路拓扑结构;

c. 利用故障换流器三相暂态电流和故障换流器闭锁时刻直流电压识别故障种类和位置是切实可行的, 所提故障诊断算法适用于不同控制模式下的系统运行诊断。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] FLOURENTZOU N, AGELIDIS A G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems; an overview [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(4): 592-602.
- [2] 汤广福. 基于电压换流器的高压直流输电技术 [M]. 西安: 中国电力出版社, 2010: 2-13.
- [3] 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. DONG Yunlong, LING Weijia, TIAN Jie, et al. Control & protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 169-175.
- [4] 同向前, 伍文俊, 任碧莹. 电压源换流器在电力系统中的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 134-174.
- [5] AHMED W, MANOHAR P. DC line protection for VSC-HVDC system [C] // IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems. Bengaluru, India: IEEE, 2012: 1-6.
- [6] HE L, LIU C, PITTO A, et al. Distance protection of AC grid with HVDC-connected offshore wind generators [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 493-501.
- [7] CHANG P, HUANG A Q. A protection scheme against DC faults VSC based DC systems with bus capacitors [C] // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Fort Worth, TX, USA: IEEE, 2014: 3423-3428.
- [8] 陈海荣. 交流系统故障时 VSC-HVDC 系统的控制与保护策略研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013. CHEN Hairong. Control and protection of VSC based HVDC system under AC system fault conditions [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [9] WANG Yan, ZHAO Shuzhen, CHENG Huangfu, et al. A dynamic

- model and control strategy for the voltage source converter based HVDC transmission system under fault AC conditions [C] // Power & Energy Society General Meeting. Calgary, AB, Canada; IEEE, 2009:1-6.
- [10] 张家奇, 吴坚, 于飞. 基于神经网络的 HVDC 系统故障诊断[J]. 高电压技术, 2006, 32(5):65-68.
ZHANG Jiaqi, WU Jian, YU Fei. Neural network based fault diagnosis in HVDC system [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5):65-68.
- [11] 孙晓云, 同向前, 尹军. VSC-HVDC 系统换流器故障仿真分析及诊断方法的研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(6):1383-1390.
SUN Xiaoyun, TONG Xiangqian, YIN Jun. Simulation analysis and diagnosis on converter fault in VSC-HVDC system [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6):1383-1390.
- [12] 杨杰, 郑健超, 汤广福, 等. 电压源换相 HVDC 站内交流母线故障特性及保护配合[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16):6-11.
YANG Jie, ZHENG Jianchao, TANG Guangfu, et al. Internal AC bus fault characteristics of VSC-HVDC system and protection coordination [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16):6-11.
- [13] 全国电力电子学标准化技术委员会. 基于电压源换流器的高压直流输电: GB/T 30553—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [14] 徐国政, 张节容, 钱家骊. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000:3-6.

作者简介:



孙晓云

孙晓云(1977—),女,陕西铜川人,讲师,博士,通信作者,主要从事高压直流输电技术方面的研究(E-mail: sunxiaoyun@xust.edu.cn);

高鑫(1975—),男,陕西户县人,高级工程师,硕士,主要从事电力系统自动化的运行管理和研究工作;

同向前(1961—),男,陕西户县人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事现代电力电子技术及其在电力系统应用等方面的研究。

Fault diagnosis algorithm for converter of VSC-HVDC system with failed valve arm blocking

SUN Xiaoyun¹, GAO Xin², TONG Xiangqian³

(1. College of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Northwest Subsection of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China;

3. College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: According to five types of ordinary penetrating faults inside the converter of VSC-HVDC system, including short circuit failure of IGBT valve device, bridge straight-through fault, AC-side single-phase grounding fault, AC-side two-phase short circuit fault and DC-side monopole grounding fault, the coordination scheme of fault protection and fault diagnosis for converter is studied. Based on analyzing the system change rules of DC voltage and AC current under the condition of blocking protection, a fault diagnosis algorithm for fault classification and location of converter is proposed, which takes the DC voltage at blocking time and three-phase AC current during two cycles after blocking time as the characteristics signals. Moreover, the voltage and current thresholds for fault classification are determined. A VSC-HVDC system model built in PSCAD/EMTDC is used to validate the proposed fault diagnosis method by simulating serious penetrating faults inside the converter. The simulative results prove that the proposed method can not only identify fault type reliably, but also locate fault position accurately, which is suitable for fault diagnosis for the converter of VSC-HVDC system under the condition of failed valve arm blocking.

Key words: voltage source converter; HVDC power transmission; fault protection; electric fault location; valve arm blocking

附录 A

图 3 中各物理量含义如下： u_{sa1} 、 u_{sb1} 、 u_{sc1} 为换流器 VSC1 交流侧三相电源； R_1 为 VSC1 交流侧等值损耗电阻； L_1 为 VSC1 交流侧等值电感； i_{a1} 、 i_{b1} 、 i_{c1} 为 VSC1 交流侧三相电流； U_{dc1} 为 VSC1 直流输出口电压； C 为 VSC1 直流侧支撑电容； R_d 为直流输电线路等值阻抗；换流器 VSC2 物理量与 VSC1 相似。

仿真示例系统参数为：三相交流系统电压为 10kV；直流额定电压为 20kV；交流滤波电感为 10mH；直流支撑电容为 500 μ F。系统采用背靠背运行方式、幅相控制策略，送端换流器采用定有功/无功控制，受端换流器采用定直流电压/无功控制，送端定值参数 5MW/2Mvar，受端定值参数 20kV/-2Mvar。

附录 B

因为换流器电抗值远远大于等效电阻值^[4]，忽略 R_1 的影响，假定 V_{D14} 、 V_{D16} 导通，则分别需要满足式 (B1) 和式 (B2)。

$$u_{sa1} - u_{sb1} + L_1 \left(\frac{di_{b1}}{dt} - \frac{di_{a1}}{dt} \right) - U_{dc1} > 0 \quad (\text{B1})$$

$$u_{sa1} - u_{sc1} + L_1 \left(\frac{di_{c1}}{dt} - \frac{di_{a1}}{dt} \right) - U_{dc1} > 0 \quad (\text{B2})$$

考虑到受端工作于 STATCOM，一般系统运行工况下直流电压值为换流器交流电源线电压有效值的 2 倍^[4]，即三相电源电压瞬时表达式为：

$$\begin{aligned} u_{sa1} &= \sqrt{\frac{1}{6}} U_{dc1} \sin(\omega t) \\ u_{sb1} &= \sqrt{\frac{1}{6}} U_{dc1} \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_{sc1} &= \sqrt{\frac{1}{6}} U_{dc1} \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (\text{B3})$$

忽略电抗器影响，把式 (B3) 分别代入式 (B1)、(B2)， V_{D14} 、 V_{D16} 的导通条件分别为：

$$\sqrt{\frac{1}{6}} U_{dc1} \sin(\omega t) - \sqrt{\frac{1}{6}} U_{dc1} \sin(\omega t - 120^\circ) - U_{dc1} \geq 0 \quad (\text{B4})$$

$$\sqrt{\frac{1}{6}} U_{dc1} \sin(\omega t) - \sqrt{\frac{1}{6}} U_{dc1} \sin(\omega t + 120^\circ) - U_{dc1} \geq 0 \quad (\text{B5})$$

进一步推导式 (B4)、(B5)，得到 V_{D14} 的导通条件为 $\cos(\omega t - 60^\circ) > \sqrt{2}$ ， V_{D16} 的导通条件为 $\cos(\omega t + 60^\circ) < -\sqrt{2}$ 。显然任何情况下 V_{D14} 、 V_{D16} 导通条件均不满足，因此不存在 $i_{b1} < 0$ 、 $i_{c1} < 0$ 的情况。

电流要形成通路，二极管 V_{D13} 、 V_{D15} 导通，类似于上述分析得到 $i_{b1} \geq 0$ 、 $i_{c1} \geq 0$ 的条件分别为式 (B6)、(B7)。

$$\cos(\omega t - 60^\circ) > 0 \quad (\text{B6})$$

$$\cos(\alpha t + 60^\circ) \geq 0 \quad (B7)$$

显然存在 $1/2$ 周期 $i_{b1} \geq 0, i_{c1} \geq 0$ 的情况, 且根据三相电流之和为 0 的原理, 必然出现 $i_{a1} < 0$ 。

附录 C

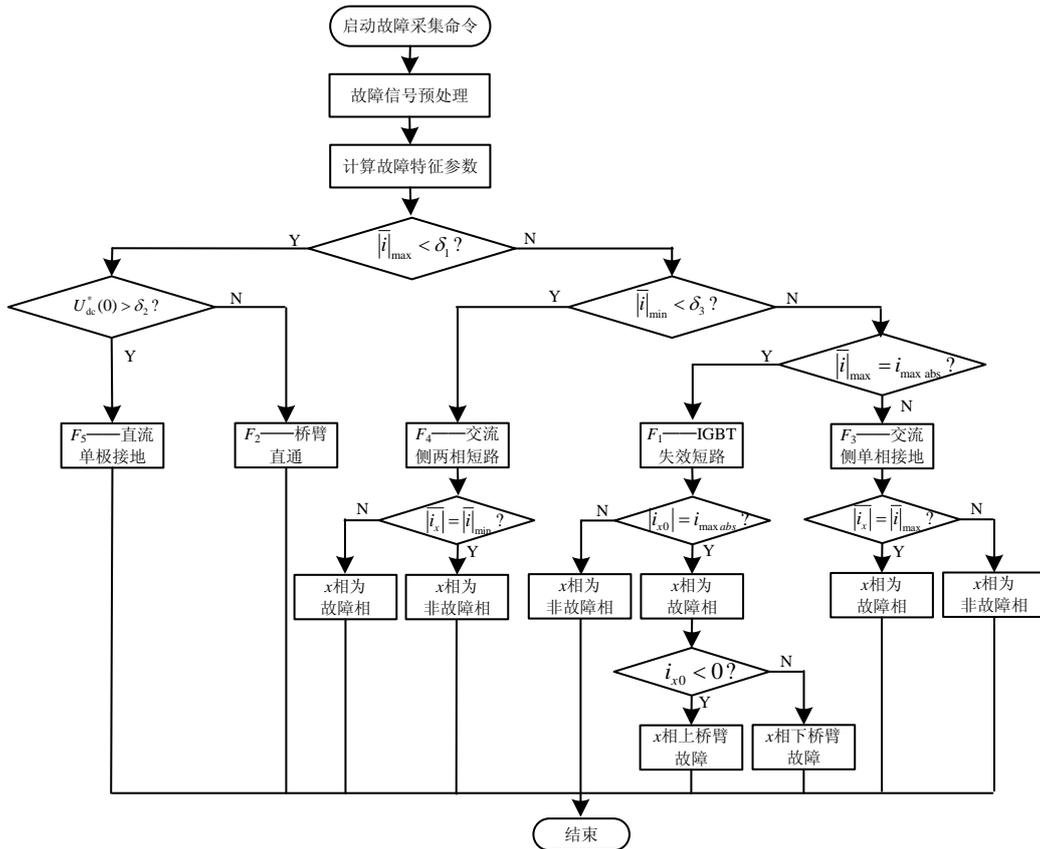


图 C1 故障类型识别和定位流程图
Fig.C1 Flowchart of fault type recognition and location

附录 D

三相交流系统电压为 10kV; 交流滤波电感为 10mH; 直流支撑电容为 500μF。直流电压设定值分别为 20kV、19kV, 有功/无功设定值分别为 4MW/1Mvar、5MW/-2Mvar; 4.01s 送端换流器故障, 10μs 后闭锁送端换流器, 受端工作于控直流电压 STATCOM 工况。

附录 E

表 E1 故障换流器故障特征参数
Tabel E1 Fault VSC feature parameters

故障类型	$U_{set}/$ kV	$U_{dc1}^*(0)$	$\overline{ i_{a1} }/$ kA	$\overline{ i_{b1} }/$ kA	$\overline{ i_{c1} }/$ kA	$\overline{ i }_{max}/$ kA	$\overline{ i }_{min}/$ kA	$i_{a10}/$ kA	$i_{b10}/$ kA	$i_{c10}/$ kA	$i_{max,abs}$ / kA
F_1	20	—	2.4141	1.0730	1.3402	<u>2.4141</u>	<u>1.0730</u>	<u>-2.414</u>	1.0730	1.3402	<u>2.4141</u>
	19	—	2.4123	1.0726	1.3397	<u>2.4123</u>	<u>1.0726</u>	<u>-2.412</u>	1.0726	1.3397	<u>2.4123</u>
	20	—	2.4141	1.0740	1.3401	<u>2.4141</u>	<u>1.0740</u>	<u>-2.414</u>	1.0740	1.3401	<u>2.4141</u>
	19	—	2.4123	1.0726	1.3397	<u>2.4123</u>	<u>1.0726</u>	<u>-2.412</u>	1.0726	1.3397	<u>2.4123</u>
F_2	20	<u>0.092</u>	0	0	0	<u>0</u>	—	—	—	—	—
	19	<u>0.091</u>	0	0	0	<u>0</u>	—	—	—	—	—
	20	<u>0.096</u>	0	0	0	<u>0</u>	—	—	—	—	—
	19	<u>0.102</u>	0	0	0	<u>0</u>	—	—	—	—	—
F_3	20	—	0.4318	0.1295	0.3023	<u>0.4318</u>	<u>0.1295</u>	0.2403	-0.083	-0.445	<u>0.2403</u>
	19	—	0.4648	0.1382	0.3263	<u>0.4648</u>	<u>0.1382</u>	0.2547	-0.092	-0.162	<u>0.2547</u>
	20	—	0.4342	0.1299	0.3043	<u>0.4342</u>	<u>0.1299</u>	0.2421	-0.086	-0.447	<u>0.2421</u>
	19	—	0.4998	0.1428	0.3570	<u>0.4998</u>	<u>0.1428</u>	0.2700	-0.098	-0.171	<u>0.2700</u>
F_4	20	—	1.2284	1.2283	0	<u>1.2284</u>	<u>0</u>	—	—	—	—
	19	—	1.2277	1.2277	0	<u>1.2277</u>	<u>0</u>	—	—	—	—
	20	—	1.2280	1.2281	0	<u>1.2281</u>	<u>0</u>	—	—	—	—
	19	—	1.2305	1.2305	0	<u>1.2305</u>	<u>0</u>	—	—	—	—
F_5	20	<u>0.504</u>	0	0	0	<u>0</u>	—	—	—	—	—
	19	<u>0.506</u>	0	0	0	<u>0</u>	—	—	—	—	—
	20	<u>0.505</u>	0	0	0	<u>0</u>	—	—	—	—	—
	19	<u>0.506</u>	0	0	0	<u>0</u>	—	—	—	—	—