

计及保护动作与换相失败的逆变侧阀短路故障定位

王力¹, 黄明伟¹, 周仕豪², 曾祥君¹

(1. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要: 鉴于现有阀短路故障定位方法依赖桥臂电流信息, 而目前工程实际中存在桥臂电流不易获取、定位精度不高的问题, 提出了一种无需桥臂电流的逆变侧阀短路故障定位方法。考虑控保系统对不同位置阀短路故障响应特性以及逆变侧阀短路故障引起的换相失败对故障特征的影响, 分析了不同时刻发生逆变侧区内4种典型阀短路故障的故障特征。结合逆变侧保护动作情况和系统电气量特征, 设计了不同位置阀短路故障识别判据, 进而实现逆变侧换流器区不同位置阀短路故障定位。基于RTDS与实际控保系统的数模混合仿真验证了所提故障定位方法的有效性。

关键词: 高压直流输电; 阀短路故障; 故障定位; 换相失败; RTDS数模混合仿真

中图分类号: TM46

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202301026

0 引言

随着我国众多基于电网换相换流器的高压直流输电(line commutated converter-high voltage direct current, LCC-HVDC)工程的陆续投运, 其在区域电网互联、大容量绿色电能远距离外送等方面的作用日益突出^[1]。作为LCC-HVDC系统运行的核心设备, 换流器的安全稳定运行至关重要, 实际工程中为其配置了各种保护。其中, 阀短路故障作为LCC-HVDC系统最严重的一类故障^[2-3], 其发生后必须尽快切除以保护换流器。然而受制于换流器的结构, 不同位置的阀短路故障与阀短路保护不能一一对应^[3], 故障后的分析依赖富有经验的运行人员, 严重制约了故障的迅速排查和抢修。因此, 研究阀短路故障的定位方法对于提升事故分析效率、保障LCC-HVDC系统高效运行具有重要意义。

目前, 国内外学者针对LCC-HVDC换流器的故障分析与定位开展了众多研究。有学者利用直流保护动作信息进行故障定位, 如: 文献[4]基于对整流侧区内外典型接地故障的特征分析, 提出了基于直流差动保护动作的接地故障定位方案; 文献[5]利用故障后不同位置故障特征存在的时间差异, 实现逆变侧接地故障定位; 文献[6]根据2类阀短路保护动作情况, 通过故障时段划分, 提出了定位故障桥的方

法, 但未能对各桥中的不同故障进行区分; 文献[7]通过将换流器区细分为多个区域, 利用定义的差流识别故障区域, 但未能结合保护动作进一步提高定位精度; 文献[8]通过引入换流器桥臂电流信息, 实现精准的换流器阀短路故障定位, 然而实际工程中还不易获取桥臂电流; 文献[9]分析了基于模块化多电平换流器的高压直流输电(modular multilevel converter based high voltage direct current, MMC-HVDC)桥臂发生短路故障时的特性, 文献[10]结合保护闭锁时系统电气量特征实现柔性直流输电(voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)换流器内部故障的诊断, 为本文提供了可借鉴的研究思路。此外, 还有学者通过人工智能等算法实现换流器故障诊断^[11-13], 但该类方法需要大量数据样本, 其实际应用有待深入研究。

综上所述, 针对目前常规高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)系统阀短路故障定位精度不高、依赖桥臂电流获取的问题, 本文考虑不同故障时刻下逆变侧阀短路故障可能引起的换相失败及控制系统作用对故障特征的影响, 分析逆变侧不同位置发生阀短路故障后的系统电气量特征, 结合逆变侧换流器区典型保护动作情况, 实现逆变侧换流器区内阀短路故障定位, 并通过实时数据仿真系统(real time digital simulation system, RTDS)和实际直流控保系统的数模混合仿真验证方法的有效性。

1 换流器阀短路故障位置及保护配置

常规HVDC系统一般以2个6脉动换流器串联构成一极, 并分别通过 Y_0/Y 和 Y_0/D 这2种联结方式的换流变连接6脉动换流器以改善系统谐波状况^[2-3]。就逆变侧而言, 换流器区内可能发生的阀短路故障(参见图1)主要包括Y桥、D桥换流变阀侧相

收稿日期: 2022-06-21; 修回日期: 2022-12-13

在线出版日期: 2023-02-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52037001, 52107071); 国网江西省电力有限公司重大科技专项(52182020008J)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52037001, 52107071) and the Major Science and Technology Project of State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd.(52182020008J)

间短路故障 K_{Y1} 、 K_{D1} , Y桥、D桥换流器6个桥臂故障 K_{Y2i} 、 K_{D2i} ($i=1, 2, \dots, 6$), Y桥、D桥换流器出线短路故障 K_{Y3} 、 K_{D3} 及12脉动换流器出线短路故障 K_4 。图1中: V_{Y1} — V_{Y6} 、 V_{D1} — V_{D6} 分别为Y桥和D桥换流器的桥臂; I_{YA} 、 I_{YB} 、 I_{YC} 为Y桥三相电流; I_{YMAX} 为Y桥三相电流绝对值的最大值; I_{DA} 、 I_{DB} 、 I_{DC} 为D桥三相电流; I_{DMAX} 为D桥三相电流绝对值的最大值; I_{DH} 、 I_{DN} 分别为高压直流母线电流、中性母线直流电流。

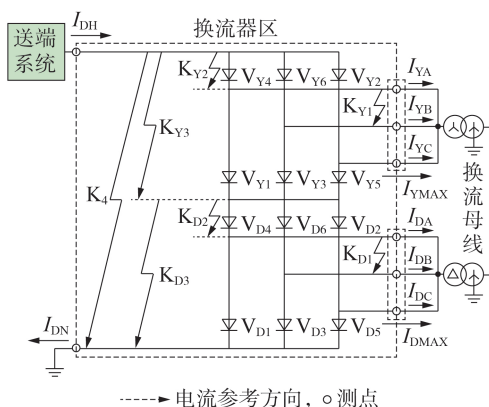


图1 逆变侧换流器配置及阀短路故障位置

Fig.1 Converter configuration and valve short faults position on inverter side

根据HVDC保护系统配置可知,对于逆变侧短路故障,可能动作的保护类型包括阀短路保护、换相失败保护等。目前,阀短路保护和换相失败保护均按6脉动换流器配置,故对于阀短路故障,可根据Y/D桥保护动作情况定位故障桥。由于Y/D桥阀短路故障特征基本一致,本文主要以Y桥为例进行分析。

对于Y桥阀短路保护,其动作判据^[3]为:

$$I_{YMAX} - \max(I_{DH}, I_{DN}) > I_{set1} \quad (1)$$

$$I_{YMAX} = \max(|I_{YA}|, |I_{YB}|, |I_{YC}|) \quad (2)$$

$$I_{set1} = I_1 + k_1 \times \max(I_{DH}, I_{DN}) \quad (3)$$

式中: I_{set1} 为保护动作整定值; I_1 为保护的启动定值,一般取为1/2的额定电流; k_1 为比例系数,取为0.2。保护延时500 μs 动作;保护动作后,立即执行逆变侧故障阀组移相,合旁通开关,同时跳换流变进线开关,隔离故障极。

逆变侧发生换相失败后,随着导通桥臂的切换,易出现同相对应的上下桥臂均导通引起交流相电流大幅减小、直流电流增大的故障特征,据此设计的Y桥换相失败保护动作判据为:

$$\max(I_{DH}, I_{DN}) - I_{YMAX} > I_{set2} \quad (4)$$

$$I_{set2} = I_2 + k_2 \times \max(I_{DH}, I_{DN}) \quad (5)$$

$$I_{YMAX} < 0.65 \times \max(I_{DH}, I_{DN}) \quad (6)$$

式中: I_{set2} 为保护动作整定值; I_2 为保护的启动定值,一般取为10%的额定电流; k_2 为比例系数,取为0.1。

换相失败保护动作时限根据计时和计次原理存在不同,保护动作原理及动作后执行的操作,具体可参考文献[3]。实际控保系统延时3 ms报警,而换相失败保护动作最短需要650 ms,对于故障定位而言,该段延时过长,故考虑利用换相失败报警信息进行故障定位。

2 逆变侧换流器阀短路故障特征分析

根据HVDC系统运行原理^[2-3]易知,控制系统通过调节整流侧和逆变侧换流器的触发角,实现功率传输,其基本公式为:

$$I_d = \frac{U_{dR} - U_{dI}}{R_L} \quad (7)$$

为便于后续分析,将 U_{dI} 表示为:

$$U_{dI} = U_{dIY} + U_{dID} \quad (8)$$

对应的Y桥电压可表示为:

$$U_{dIY} = U_{dI0Y} \cos \gamma = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \cos \gamma \quad (9)$$

式中: I_d 为直流线路电流; R_L 为直流线路电阻; U_{dR} 为整流侧直流电压; U_{dI} 为逆变侧直流电压; U_{dIY} 、 U_{dID} 分别为逆变侧Y、D桥直流电压; U_{dI0Y} 为逆变侧Y桥直流空载电压; γ 为逆变器关断角; E 为逆变侧Y桥阀侧交流线电压。

由于HVDC系统运行依赖控制系统,而故障后控制系统作用对故障特征的影响是需要考虑的影响因素之一^[4]。在实际直流工程中,逆变器在额定工况运行时,关断角约为 17° ,对应的阀控系统给出的触发角指令值约为 150° ^[14]。考虑到阀短路故障时刻具有随机性,故障电流的流向取决于对应的电压情况。因此,为便于后续分析,将逆变器额定工况下1个交流周期内对应的电压和电流情况示于图2。图中: u_a 、 u_b 、 u_c 为逆变侧三相交流电压; N 为采样点数,保护录波采样率为10 kHz;电压、电流均为标么值。

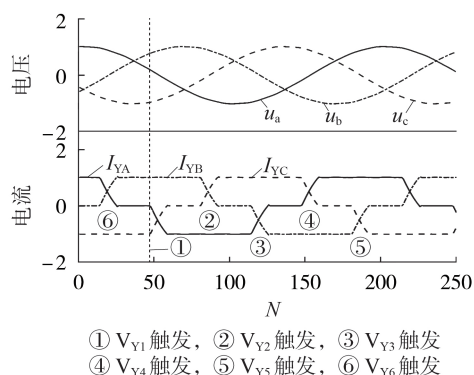


图2 逆变器额定工况下1个交流周期内对应的电压、电流

Fig.2 Voltage and current of inverter under rated working conditions within one AC cycle

2.1 12脉动换流器出线短路故障 K_4

若逆变侧发生12脉动换流器出线短路故障,故障后形成2条电流回路,如图3所示。图中 L_r 为各相等效换相电感。回路1由送端系统、直流线路、故障点和接地极构成,由于故障点相当于短路了逆变侧Y、D桥电源,式(7)中的 U_{di} 降为0,回路电流 I_{DH} 、 I_{DN} 增大;回路2由Y/D桥导通桥臂和换流变构成,由于回路1的分流,流过逆变器桥臂的电流迅速降为0,导通的晶闸管随之关断,对应Y桥三相电流绝对值的最大值 I_{YMAX} 和D桥三相电流绝对值的最大值 I_{DMAX} 均为0。

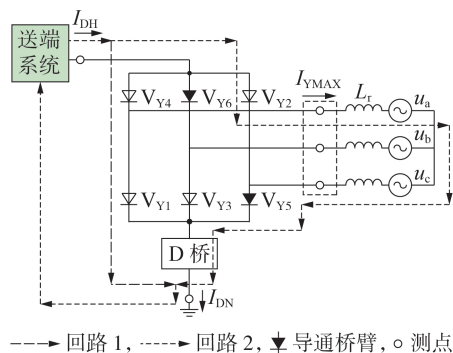


图3 发生故障 K_4 后的电流回路

Fig.3 Current loop after fault K_4 occurs

经分析可知,对于任意时刻发生的故障 K_4 ,均存在上述同样的故障特征。根据式(1)~(6)可知, K_4 的故障特征不满足阀短路故障动作判据,而符合换相失败保护动作判据,保护是否动作取决于故障持续时间,但基本已满足换相失败报警条件。 K_4 故障的RTDS仿真结果附录A图A1所示,仿真结果与上述分析一致。

2.2 Y桥换流器出线短路故障 K_{Y3}

若Y桥换流器发生出线短路故障,故障后的电流回路如图4所示。类似于12脉动桥出线短路故障的分析,此时仅相当于Y桥被短路,回路1中电流 I_{DH} 、 I_{DN} 、 I_{DMAX} 增大,回路2中电流被Y桥故障点分流,晶闸管随电流减小至0而关断,此后,Y桥电流 I_{YMAX}

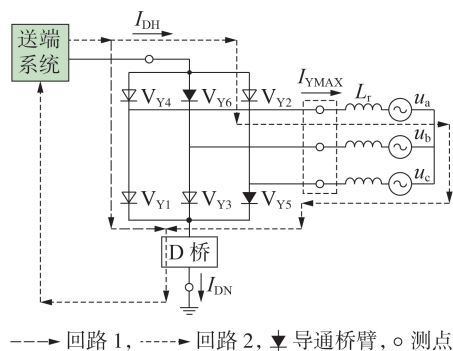


图4 K_{Y3} 故障后电流回路

Fig.4 Current loop after K_{Y3} fault

始终为0。故障 K_{Y3} 的RTDS仿真结果如附录A图A2所示,仿真结果与上述分析一致。

2.3 Y桥交流侧相间短路故障 K_{Y1}

鉴于换流变交流侧三相对称,此处以AB相间短路故障为例展开分析。换流变阀侧发生相间短路故障后的电流回路如图5所示。由于相间短路电流不经过换流器桥臂,其不受桥臂导通顺序切换而变化,仅由A相和B相电压幅值和逆变侧系统阻抗决定,回路1电流 I_{YMAX} 增大。且由于AB相间短路故障,Y桥直流电压 U_{diY} 下降,回路2电流 I_{DH} 、 I_{DN} 、 I_{DMAX} 增大,但受送端系统阻抗和直流线路阻抗的限制,其电流幅值远小于回路1电流幅值。故对于相间短路故障,故障后Y桥测点三相电流中将出现两相电流幅值远大于第三相的特征。根据式(1)~(6)可知,此时Y桥阀短路保护立即动作,换相失败保护不报警。RTDS的仿真结果如附录A图A3所示,与分析结果一致。

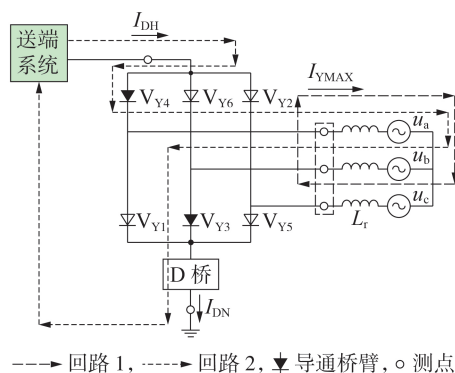


图5 发生故障 K_{Y1} 后的电流回路

Fig.5 Current loop after fault K_{Y1} occurs

2.4 逆变侧换流器桥臂短路故障特征分析

由于不同时刻故障换流器所处的导通状态不同,桥臂发生短路故障后故障特征随之不同,阀短路保护响应特性亦随之变化而呈现出动作时间离散特性^[15]。

由于LCC-HVDC系统是依靠交流电网电压进行换相的,而交流系统三相电压具有对称性,这将使桥臂短路故障特征呈现出一定的规律性,此处以Y桥桥臂 V_{Y1} 短路故障为例,分析换流器不同时刻的故障特征。显然,当桥臂 V_{Y1} 短路故障处于 V_{Y1} 正常导通阶段时,对于系统电气量并无明显影响,故需对非 V_{Y1} 导通阶段的桥臂 V_{Y1} 短路故障展开分析。

2.4.1 V_{Y2} 、 V_{Y3} 导通时桥臂 V_{Y1} 短路故障

当 V_{Y1} 故障处于换流器桥臂 V_{Y2} 、 V_{Y3} 导通时,故障后的电流回路如图6所示。结合图2中该阶段的三相电压情况可知,此时存在AB相间电压 $u_{ba} > 0$,故回路1中Y桥换流变B相经正常导通的下桥臂 V_{Y3} 和故障桥臂 V_{Y1} 与换流变A相发生相间短路故障,导

致Y桥电流 I_{YA} 、 I_{YB} 、 I_{YMAX} 增大;回路2由送端系统,直流线路,Y桥导通桥臂 V_{Y2} 、 V_{Y3} 及Y桥换流变,D桥导通桥臂、D桥换流变及接地极构成,由于回路1形成的AB相间短路故障,Y桥电压 U_{diY} 降低,回路2中的电流 I_{DH} 、 I_{DN} 、 I_{DMAX} 增大。

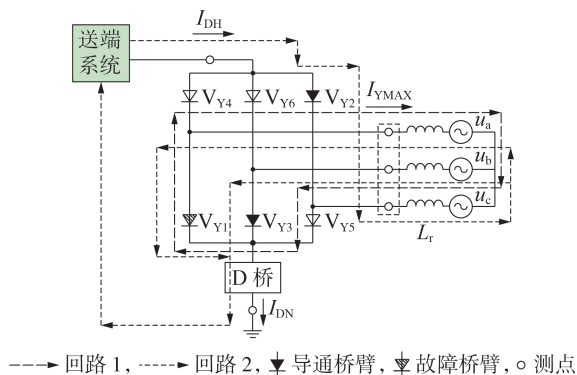


图6 V_{Y2} 、 V_{Y3} 导通时 V_{Y1} 发生短路故障后的电流回路

Fig.6 Current loop after V_{Y1} short circuit fault when V_{Y2} and V_{Y3} are on

若 V_{Y4} 触发,则由于 V_{Y4} 与 V_{Y1} 短路支路形成旁通对,流过 V_{Y4} 的电流将迅速增大。因此,此时 V_{Y2} 与 V_{Y4} 不存在换相失败的问题。根据式(1)~(6)可知, V_{Y2} 、 V_{Y3} 导通阶段符合Y桥阀短路保护动作判据,保护是否动作取决于故障电流幅值与整定值大小,换相失败不报警。

2.4.2 V_{Y4} 导通时桥臂 V_{Y1} 发生短路故障

当 V_{Y1} 故障处于换流器桥臂 V_{Y4} 、 V_{Y3} 导通阶段时,故障后的电流回路如图7所示。由于此时 V_{Y4} 与 V_{Y1} 构成旁通对,回路2中电流被分流, V_{Y3} 随回路2电流降至0后关断。当 V_{Y3} 关断后,Y桥电流 I_{YA} 、 I_{YB} 、 I_{YC} 、 I_{YMAX} 均为0;回路1直接通过Y桥旁通对、D桥、接地极、送端系统、直流线路构成回路,此时,由于Y桥被短路,逆变侧电压 U_{di} 降低,回路1电流 I_{DH} 、 I_{DN} 、 I_{DMAX} 增大,且当 V_{Y3} 关断后,桥臂 V_{Y5} 阴极电压因 V_{Y1} 短路升高为 u_a ,由图2所示 V_{Y5} 触发时的

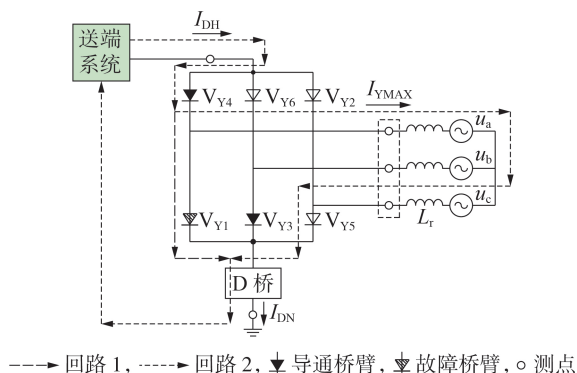


图7 V_{Y4} 导通时 V_{Y1} 发生短路故障后的电流回路

Fig.7 Current loop after V_{Y1} short circuit fault when V_{Y4} is on

三相电压关系可知, V_{Y5} 将无法正常工作。

若 V_{Y1} 短路处于桥臂 V_{Y4} 、 V_{Y5} 导通阶段,同样由于 V_{Y4} 与 V_{Y1} 形成旁通对,故障特征与换流器桥臂 V_{Y4} 、 V_{Y3} 导通时基本一致。根据保护判据式(1)~(6)可知, V_{Y4} 导通阶段Y桥换相失败报警,阀短路保护不动作。

2.4.3 V_{Y4} 、 V_{Y6} 临近换相时 V_{Y1} 发生短路故障

当桥臂 V_{Y1} 短路发生于换流器桥臂 V_{Y5} 、 V_{Y4} 导通阶段中临近触发 V_{Y6} 时,故障后 V_{Y4} 立即与 V_{Y1} 形成旁通对,Y桥换流变被短路,逆变侧等效电压降低,直流电流 I_{DH} 增大。作为故障后的首次换相,逆变侧换相失败预测控制难以及时响应,这将恶化 V_{Y4} 、 V_{Y6} 正常换相;当 V_{Y6} 触发后,系统电流回路如图8所示, V_{Y4} 与 V_{Y6} 换相过程电流按图中回路2路径流通,由于换相电流被 V_{Y1} 短路支路分流,进一步恶化 V_{Y4} 、 V_{Y6} 正常换相。

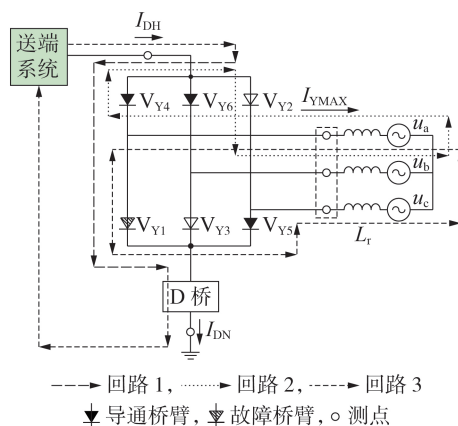


图8 V_{Y4} 、 V_{Y6} 换相失败时的电流回路

Fig.8 Current loop when commutation failure of V_{Y4} and V_{Y6} occurs

若 V_{Y4} 、 V_{Y6} 发生换相失败,则后续换流器各导通状态下的故障特征如下:

1) V_{Y6} 、 V_{Y5} 导通阶段,因 V_{Y1} 发生短路故障, V_{Y5} 承受反向电压很快关断,当 V_{Y4} 与 V_{Y6} 换相失败结束后, V_{Y6} 关断, V_{Y1} 与 V_{Y4} 形成的旁通对短路Y桥换流变,此时的故障特征与2.4.2节分析基本一致;

2) V_{Y6} 、 V_{Y1} 导通阶段, V_{Y6} 因与 V_{Y4} 发生换相失败而关断, V_{Y1} 触发后, V_{Y1} 仍与 V_{Y4} 形成旁通对,故障特征不变,与2.4.2节分析一致;

3) V_{Y2} 、 V_{Y1} 导通阶段, V_{Y2} 自收到触发脉冲后,由于 V_{Y4} 导通, V_{Y2} 阳极电压变为 u_a ,结合图2中 V_{Y2} 正常触发时的三相电压关系可知, V_{Y2} 无法正常开通,故障特征与2.4.2节分析仍一致;

4) V_{Y2} 、 V_{Y3} 导通阶段,考虑换相失败预测控制的作用, V_{Y3} 较正常运行时提前触发,这对于 V_{Y3} 与 V_{Y1} 换相是有益的,但此时 V_{Y1} 处于短路故障状态,如2.4.1节分析, V_{Y3} 在与 V_{Y1} 换相后无法关断 V_{Y1} ,导致

Y 桥换流变发生相间短路故障。

以上过程对应的 RTDS 仿真波形如附录 A 图 A4 所示。

2.4.4 V_{Y5} 、 V_{Y6} 导通时桥臂 V_{Y1} 发生短路故障

若在 V_{Y4} 和 V_{Y6} 换相结束后发生 V_{Y1} 短路故障,故障后电流回路如图 9 所示。由于 V_{Y1} 短路导致 V_{Y5} 承受反向电压,回路 1 电流随 V_{Y5} 关断而降至 0,换流器相当于未经 V_{Y1} 、 V_{Y5} 换相,直接进入 V_{Y1} 、 V_{Y6} 导通阶段。对比正常状态下的 V_{Y1} 、 V_{Y6} 导通状态,此时相当于提前触发 V_{Y1} ,即触发角 α 减小,关断角 γ 随之增大,由式(9)可知,逆变侧电压 U_{diY} 减小,故障后回路 2 中电流 I_{YA} 、 I_{YB} 、 I_{YMAX} 较正常时的 V_{Y1} 、 V_{Y6} 导通阶段电流增大。

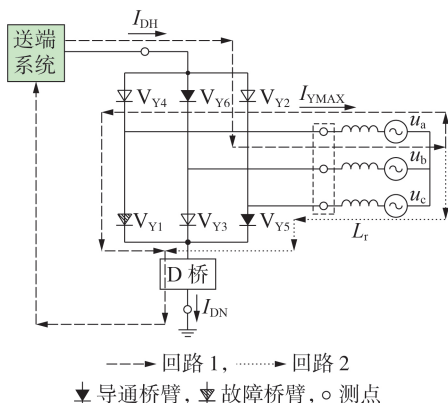


图 9 无换相失败时的电流回路

Fig.9 Current loop without commutation failure

在换流器进入正常状态时的 V_{Y1} 导通阶段,由于该阶段中 V_{Y1} 短路故障对系统电气量并无影响,电流逐渐降低至额定值。此后, V_{Y2} 触发后与 V_{Y6} 正常换相, V_{Y1} 、 V_{Y2} 导通阶段系统电气量与正常运行时基本一致。因此,当触发 V_{Y3} 后, V_{Y3} 可正常开通, V_{Y2} 、 V_{Y3} 导通阶段及后续过程与 2.4.1、2.4.2 节的分析一致。自 V_{Y6} 成功换相后发生 V_{Y1} 短路故障的 RTDS 数模混合仿真波形如附录 A 图 A5 所示,由图可知, V_{Y1} 在 V_{Y6} 成功换相后短路,后续换流器各导通阶段的故障特征与分析基本一致。

综合上述分析可以看出,由于不同时刻的桥臂故障可能引起逆变侧换流器发生换相失败,这导致故障后不同导通状态对应的故障特征存在不同。结合图 A4、A5 可知,对于 Y 桥桥臂 V_{Y1} 短路故障而言,其在 V_{Y2} 、 V_{Y3} 导通阶段易形成交流相间短路故障,由于此时故障电流幅值较大,且阀短路保护动作时限仅为 500 μs ,Y 桥阀短路保护将在该导通阶段动作。因此,可选取阀短路保护动作时刻对应的换流器导通时段特征作为桥臂短路判断依据,此特征时段可结合 Y 桥触发脉冲序列提取,如附录 A 图 A5 所示。

对于其余桥臂 V_{Y2} — V_{Y6} 短路故障存在相似的

故障特征,限于篇幅,不再具体展开分析。各桥臂故障对应的特征时段及故障特征如表 1 所示。考虑系统稳态运行时电流的微小波动及电流互感器存在的测量误差^[4,8],结合控保录波分析,用于识别故障特征的阈值 Δ_1 可取为 0.1 p.u., Δ_2 可取为 1.1 p.u.。

表 1 不同桥臂故障的特征时段及故障特征

Table 1 Characteristic period and fault characteristics of different bridge arm faults

故障桥臂	特征时段	对应 Y 桥触发脉冲值	故障特征		
			I_{YA}	I_{YB}	I_{YC}
V_{Y1}	V_{Y2} 、 V_{Y3} 导通时段	6	$>\Delta_1$	$<-\Delta_2$	—
V_{Y2}	V_{Y4} 、 V_{Y3} 导通时段	12	$>\Delta_2$	—	$<-\Delta_1$
V_{Y3}	V_{Y4} 、 V_{Y5} 导通时段	24	—	$>\Delta_1$	$<-\Delta_2$
V_{Y4}	V_{Y6} 、 V_{Y5} 导通时段	48	$<-\Delta_1$	$>\Delta_2$	—
V_{Y5}	V_{Y6} 、 V_{Y1} 导通时段	33	$<-\Delta_2$	—	$>\Delta_1$
V_{Y6}	V_{Y2} 、 V_{Y1} 导通时段	3	—	$<-\Delta_1$	$>\Delta_2$

3 逆变侧换流器阀短路故障定位

3.1 不同位置故障差异分析

根据第 2 节中逆变侧不同位置阀短路故障特征的分析可知:发生交流侧相间短路后,仅有阀短路保护动作,且保护迅速动作;对于桥臂短路故障,若故障恰好发生于换流器特征时段,则无换相失败报警,仅有阀短路保护动作;若故障发生在换流器特征时段结束后,阀短路保护需要经过 1 个换相周期至特征时段后才会动作,在此过程中将伴随着换相失败报警;因此对于桥臂短路故障而言,阀短路保护肯定动作,换相失败可能报警;6 脉动和 12 脉动换流器出线短路故障不会导致阀短路保护动作,而一般会引引起换相失败报警,换相失败保护是否动作取决于故障时长。

对于换流变阀侧交流相间短路,相间短路电流可表示为^[2]:

$$I_{s2} = \frac{\sqrt{2} E}{2\omega L_r} \quad (10)$$

式中: I_{s2} 为相间短路电流; ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$, f 为电网频率。

由于换流变阀侧交流相间短路电流不经过换流器桥臂,电流幅值仅由 E 决定;故障后逆变侧控制系统减小触发角 α 以增大关断角 γ ,对相间短路电流并无影响,且由于该类型故障需要保护动作后执行跳交流进线开关才能被切除,故障电流幅值可达到最大值。

对于桥臂短路特征时段对应的电流特征,如

V_{Y2} 、 V_{Y3} 导通阶段 V_{Y1} 故障,其故障电流由AB相间短路提供,其电流幅值亦可由式(10)表示。但由于后续 V_{Y4} 导通与 V_{Y1} 故障支路形成旁通对,迫使AB相间短路中断。因此,桥臂短路特征时段的故障电流幅值低于交流侧相间短路,可通过比较故障电流幅值实现交流相间短路与桥臂短路故障的区分。结合附录A图A4和图A5可知,阀短路保护利用特征时段的故障电流动作,故控制系统的作用未使特征时段的故障特征发生变异。

对于6脉动和12脉动换流器出线短路,故障特征体现为逆变侧Y/D桥电流长时间始终为0,此时,控制系统作用仅会影响直流电流幅值,对Y/D桥故障特征无影响。而对于其他类型故障引起的换相失败报警,如交流系统故障、换流器误触发、不触发故障及换流器接地故障等^[14,16-17],其单次电流持续为0的时长至多持续2个换流器导通状态,不会在故障期间存在Y/D桥电流始终为0的特征,可据此实现与其他类型故障的区分。

3.2 定位方案设计

换流器稳态运行时,为避免Y/D桥换相时刻的交叠,换相角一般小于 30° ^[3],结合图2中额定工况下的数据,计算得出换流器6个导通状态对应的电角度约为 38° ,对应时长约为2.2 ms。为保证桥臂短路故障的可靠识别,故障数据必须包含特征时段对应数据,故取故障开始至阀短路保护动作后2.2 ms内的数据用于故障定位。

对于仅有换相失败报警的故障,换流器2个导通状态及1个换相过程的总时间约为5.4 ms。为保证判据的可靠性,结合大量的仿真,取故障开始至换相失败报警后8 ms数据用于判断。

以Y桥为例,为简化不同时刻Y桥交流相间短路故障的识别过程,直接利用 I_{YMAX} 提取故障电流幅值信息,结合文献[14]对逆变侧阀短路故障电流的分析,将用于区分桥臂短路故障与交流相间短路故障的阈值取为3.0 p.u.,以躲过最大的桥臂短路电流。结合已有研究^[4]可知,一般根据连续3~5个采样点满足判据实现判断,保护录波为10 kHz,此处通过连续0.5 ms数据满足判据进行故障分类。对于桥臂短路故障,则通过Y桥触发脉冲序列提取故障特征时段,结合表1所示的故障特征即可实现不同桥臂短路故障的定位;对于12脉动和6脉动换流器出线短路故障,则通过故障后 I_{YMAX} 和 I_{DMAX} 是否始终小于 Δ_1 进行判断。

逆变侧阀短路故障定位流程如附录A图A6所示,具体步骤如下。

1)检测阀短路保护是否动作,若不存在Y桥和D桥阀短路保护动作,而仅存在换相失败报警,进入步骤2);若仅存在Y桥阀短路保护动作,则进入

步骤3)。

2)取故障开始后8 ms数据,判断是否始终存在 $I_{YMAX} < \Delta_1$ 且 $I_{DMAX} < \Delta_1$,若存在,则判断为12脉动换流器出线短路故障;若不存在,则判断是否始终存在 $I_{YMAX} < \Delta_1$ 或 $I_{DMAX} < \Delta_1$,若满足则判断为对应Y/D桥的6脉动出线短路。

3)取故障开始至阀短路保护动作后2.2 ms的数据,判断是否存在0.5 ms的数据均满足 $I_{YMAX} > 3.0$ p.u.,若存在,则判断为换流变阀侧交流相间短路,若不存在,则进入步骤4)。

4)利用Y桥三相电流 I_{YA} 、 I_{YB} 、 I_{YC} 和Y桥换流器触发脉冲 p_Y ,判断在 $p_Y=6$ 时,是否存在0.5 ms的数据满足 $I_{YA} > \Delta_1$ 且 $I_{YB} < \Delta_2$,若存在,则判断为Y桥桥臂 V_{Y1} 发生短路故障,若不存在,则进入步骤5)。

5)判断在 $p_Y=12$ 时,是否存在0.5 ms的数据满足 $I_{YA} > \Delta_2$ 且 $I_{YC} < -\Delta_1$,若存在,则判断为Y桥桥臂 V_{Y2} 发生短路故障,若不存在,则进入步骤6)。

6)判断在 $p_Y=24$ 时,是否存在0.5 ms的数据满足 $I_{YC} < -\Delta_2$ 且 $I_{YB} > \Delta_1$,若存在,则判断为Y桥桥臂 V_{Y3} 发生短路故障,若不存在,则进入步骤7)。

7)判断在 $p_Y=48$ 时,是否存在0.5 ms的数据满足 $I_{YA} < -\Delta_1$ 且 $I_{YB} > \Delta_2$,若存在,则判断为Y桥桥臂 V_{Y4} 发生短路故障,若不存在,则进入步骤8)。

8)判断在 $p_Y=33$ 时,是否存在0.5 ms的数据满足 $I_{YA} < -\Delta_2$ 且 $I_{YC} > \Delta_1$,若存在,则判断为Y桥桥臂 V_{Y5} 发生短路故障,若不存在,则进入步骤9)。

9)判断在 $p_Y=3$ 时,是否存在0.5 ms的数据满足 $I_{YB} < -\Delta_1$ 且 $I_{YC} > \Delta_2$,若存在,则判断为Y桥桥臂 V_{Y6} 发生短路故障。

3.3 故障定位方案验证

为了验证本文所提故障定位方法的有效性,基于RTDS与实际直流控保系统的数模混合仿真,在1个换相周期内,以A相电压相角为参考,设置不同故障角以模拟不同时刻的阀短路故障,得出各故障位置的故障特征及本文所提方法得到的故障定位结果,具体如附录A表A1所示。由表中的数据可知,本文所提方法能够实现逆变侧各种阀短路故障的可靠定位。

4 结论

1)逆变侧发生12脉动和6脉动换流器出线短路时,故障电流不流经换流器,故障特征表现为Y/D桥电流故障期间始终为0,阀短路保护不动作,若故障时间较短,则由控制系统恢复;若故障时间较长,满足换相失败保护时限,则最终由换相失败保护动作切除。

2)换流变阀侧交流相间短路电流远大于逆变侧12脉动和6脉动换流器出线短路、桥臂短路故障下

的电流,故障后阀短路保护迅速动作。

3)不同时刻发生的换流器桥臂短路故障,存在故障期间附加发生换相失败的风险,阀短路保护依靠交流系统提供的短路电流动作,可通过提取特征时段交流系统提供的短路电流特征实现不同桥臂短路故障的定位。

4)综合分析逆变侧不同位置发生阀短路故障时的时空特征差异,结合实际保护的動作情况,提出了计及保护动作特性的逆变侧阀短路故障定位方法,并结合RTDS和实际控保系统验证了所提方法的可靠性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 曾蕊,李保宏,刘天琪,等. 受端多落点级联型混合直流输电系统协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(2):111-117.
ZENG Rui, LI Baohong, LIU Tianqi, et al. Coordinated control strategy of receiving-end multi-point cascaded hybrid DC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 111-117.
- [2] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004:26-43.
- [3] 陶瑜. 直流输电控制保护系统分析及应用[M]. 北京:中国电力出版社, 2015:1-17, 199-219, 254-258.
- [4] 张海强,林圣,刘磊,等. 基于直流差动保护动作的送端换流器接地故障定位方案[J]. 电网技术, 2018, 42(8):2382-2392.
ZHANG Haiqiang, LIN Sheng, LIU Lei, et al. Grounding fault location scheme of HVDC rectifier based on the action of DC differential protection[J]. Power System Technology, 2018, 42(8):2382-2392.
- [5] 刘洋,李晓华,蔡泽祥. 直流输电系统换流器接地故障定位[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8):86-91.
LIU Yang, LI Xiaohua, CAI Zexiang. Location of HVDC converter grounding fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8):86-91.
- [6] 郑涛,祁欢欢,范莹. 基于阀短路保护的HVDC换流器区内故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5):99-104.
ZHENG Tao, QI Huanhuan, FAN Ying. A new valve short-circuit protection based method for identifying fault locations in HVDC converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5):99-104.
- [7] 陈德扬,罗伟,郭琦,等. 常规直流阀区故障与测量隐患定位方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12):167-173.
CHEN Deyang, LUO Wei, GUO Qi, et al. Location method of fault and hidden measurement defect for LCC-HVDC valve area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12):167-173.
- [8] 刘磊,林圣,李小鹏,等. 基于电流积分的HVDC系统阀短路故障分类与定位方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(20):112-117.
LIU Lei, LIN Sheng, LI Xiaopeng, et al. Current integral based method for valve short-circuit fault classification and location in HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20):112-117.
- [9] 张芳,杜雪靓,陈堃. MMC-HVDC系统换流器桥臂短路故障暂态特性分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5):180-189.
ZHANG Fang, DU Xuejing, CHEN Kun. Transient characteristic analysis of converter bridge arm short circuit fault in MMC-HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5):180-189.
- [10] 孙晓云,高鑫,同向前. 考虑故障阀臂封锁条件下的VSC-HVDC换流器故障诊断算法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10):121-126.
SUN Xiaoyun, GAO Xin, TONG Xiangqian. Fault diagnosis algorithm for converter of VSC-HVDC system with failed valve arm blocking[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10):121-126.
- [11] 刘霄涵,王渝红,胡松伶,等. 基于SVD-SVM的HVDC换流器故障诊断[J]. 高压电器, 2016, 52(10):86-91.
LIU Xiaohan, WANG Yuhong, HU Songling, et al. Fault diagnosis for HVDC converters based on SVD-SVM[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(10):86-91.
- [12] KE Longzhang, ZHANG Yong, YANG Bo. Fault diagnosis with synchrosqueezing transform and optimized deep convolutional neural network: an application in modular multilevel converters[J]. Neurocomputing, 2021, 430:24-33.
- [13] CHEN Tangxian, LI Shuangjie, TUO Zhuxiong, et al. Fault diagnosis for HVDC converter based on support vector machine [C]// The 27th Chinese Control and Decision Conference. Qingdao, China: IEEE, 2015:6216-6220.
- [14] 张颖,邵能灵,徐斌. 高压直流输电系统阀短路保护动作特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8):97-102, 107.
ZHANG Ying, TAI Nengling, XU Bin. Operation characteristics analysis for valve short-circuit protection in HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8):97-102, 107.
- [15] 张志强,余超耘,刘强,等. 换流器保护在交流故障下的出口时序特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10):85-90.
ZHANG Zhiqiang, YU Chaoyun, LIU Qiang, et al. Research on the trip timing order characteristics of converter protections under AC faults[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10):85-90.
- [16] 王维庆,刘俊勇,王海云,等. HVDC换流阀故障特性分析及直流侧100 Hz谐波计算方法研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(1):33-38.
WANG Weiqing, LIU Junyong, WANG Haiyun, et al. Analysis of HVDC valve fault characteristics and study of DC-side 100 Hz harmonic calculation method[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1):33-38.
- [17] 董曼玲,黎小林,何俊佳,等. 特高压直流输电系统换流站内部故障电磁暂态响应特性及控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(3):5-10.
DONG Manling, LI Xiaolin, HE Junjia, et al. Electromagnetic transient response characteristics of internal faults in UHVDC converter station and corresponding control strategy[J]. Power System Technology, 2010, 34(3):5-10.

作者简介:



王力

王力(1990—),男,讲师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: wangli@csust.edu.cn);

黄明伟(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为特高压直流输电系统故障诊断与定位(E-mail: 2876421264@qq.com);

周仕豪(1993—),男,工程师,硕士,主要研究方向为特高压直流输电技术(E-mail: 1914093166@qq.com)。

(编辑 任思思)

Inverter-side valve short circuit fault location considering protection action and commutation failure

WANG Li¹, HUANG Mingwei¹, ZHOU Shihao², ZENG Xiangjun¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: In view of the problems that the existing valve short circuit fault location method relies on obtaining the bridge arm current information which is difficult to be obtained in the current engineering practice as well as has low fault location accuracy, a new inverter-side valve short circuit fault location method without bridge arm current is proposed. Considering the response characteristics of the control and protection system to the valve short circuit fault at different positions and the commutation failure influence caused by the inverter-side valve short circuit fault on the fault characteristics, the fault characteristics of four typical valve short circuit faults in the inverter-side area at different times are analyzed. Based on the protection action of the inverter side and the system electrical information, the identification criteria for valve short circuit faults at different positions are designed, then the location of valve short circuit fault at different positions in the inverter-side converter area is realized. The effectiveness of the proposed method is verified by the digital-analog hybrid simulation based on RTDS with the actual control and protection system.

Key words: HVDC power transmission; valve short circuit fault; fault location; commutation failure; RTDS digital-analog hybrid simulation

(上接第111页 continued from page 111)

Coordinated frequency auxiliary control strategy of wind farm and gas turbine on offshore oil and gas platform based on multi-agent

MENG Qingwei¹, LI Ruiyang¹, LIU Kuan¹, HAN Meiyu¹, LI Ruishuai²

(1. College of New Energy, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580, China;

2. Liaocheng Chiping District Power Supply Company of State Grid Shandong Electric Power Company, Liaocheng 252100, China)

Abstract: In order to improve the frequency regulation capability of offshore oil and gas platform power grid containing wind power, a coordinated frequency auxiliary control method of wind farm and gas turbine unit on the offshore oil and gas platform is proposed based on the multi-agent consistency theory, inside the wind farm a double-fed induction generator is taking as a unit. The offshore isolated power grid is regarded as a multi-agent system, the wind farm and the gas turbine unit on the offshore oil and gas platform are regarded as agents. Based on the topological information of the offshore power network, the communication network of multi-agent system is constructed to realize the information interaction among agents. The multi-agent models of frequency auxiliary control for wind farm and gas turbine unit on offshore oil and gas platform are established respectively. The controller structure is given based on the multi-agent consistency algorithm, and the frequency coordination control between wind farm agents and gas turbine unit agents is realized based on the multi-agent communication network. The parameters of the controller are optimized by linear quadratic optimal control. The effectiveness of the proposed control method is verified by a simulation example. The results show that the proposed coordinated frequency auxiliary control method can effectively improve the frequency regulation capability of the system and suppress frequency fluctuations.

Key words: offshore oil and gas platform; wind farms; gas turbine unit; frequency auxiliary control; multi-agent; coordinated control

附录 A

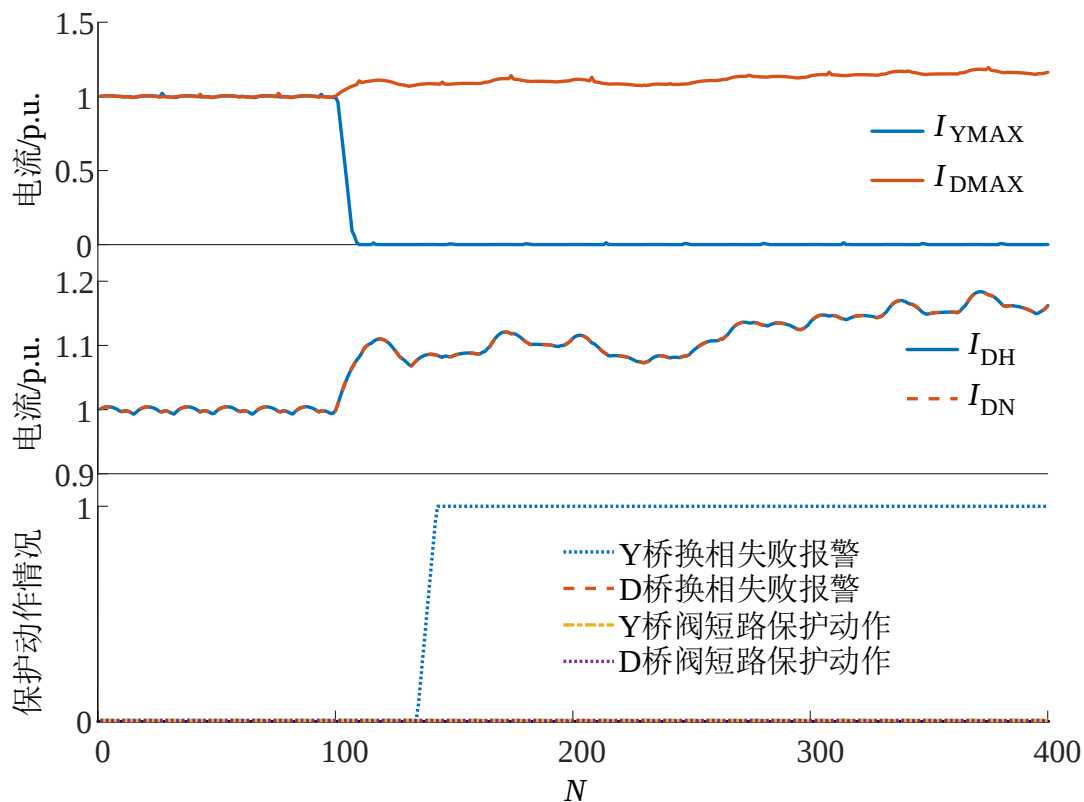


图 A1 故障 K_4 发生后的控保录波

Fig.A1 Control and protection recording wave after K_4 fault

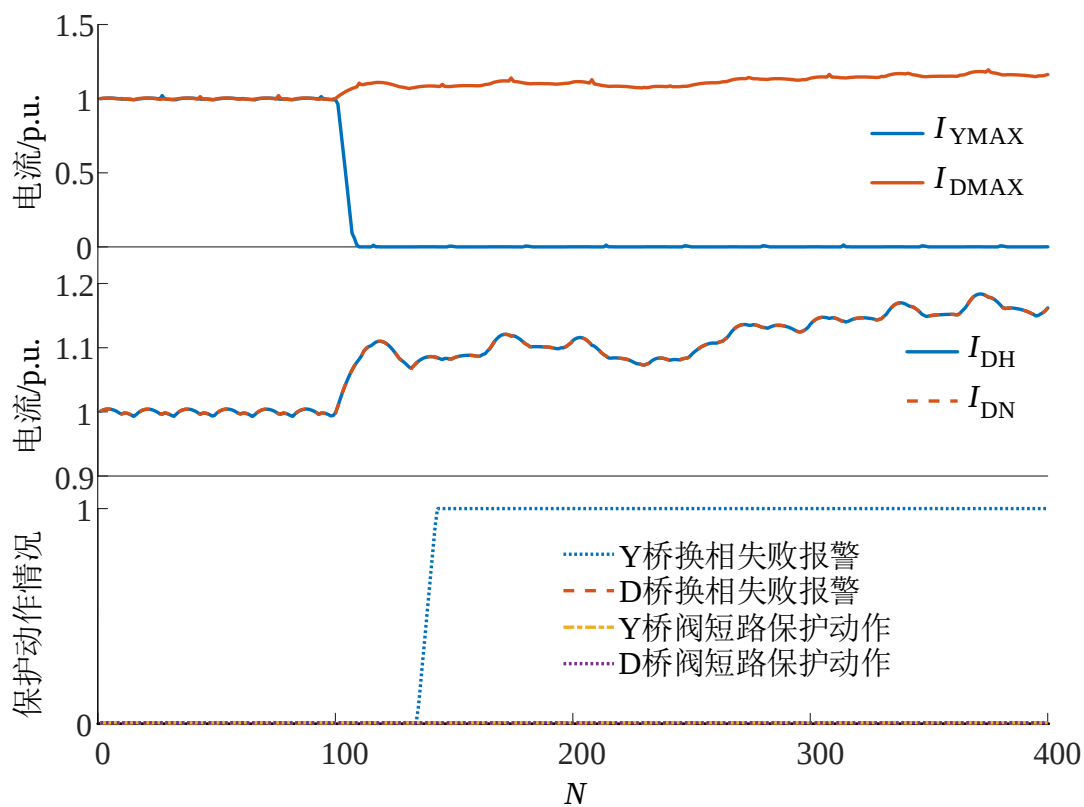


图 A2 故障 K_{Y3} 发生后的控保录波

Fig.A2 Control and protection recording wave after K_{Y3} fault occurs

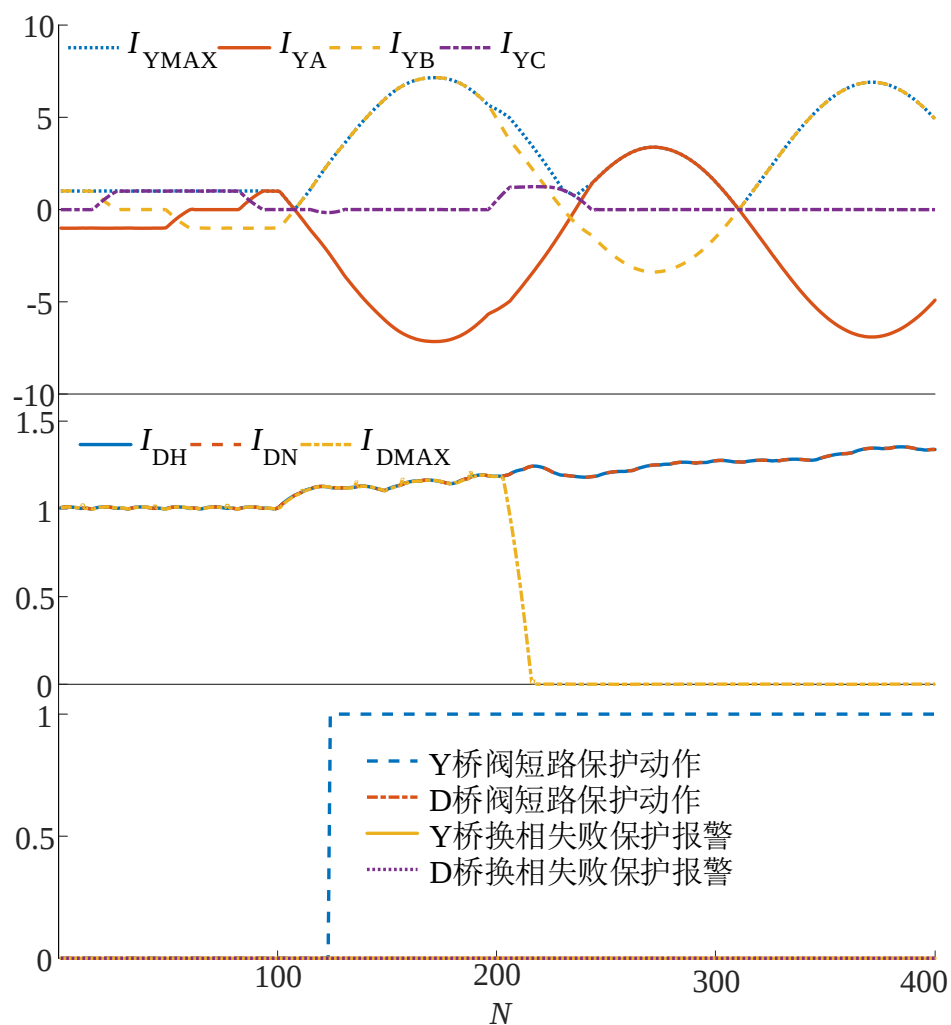


图 A3 AB 相间短路故障时控保录波

Fig.A3 Control and protection recording wave when short circuit fault between phase A and B

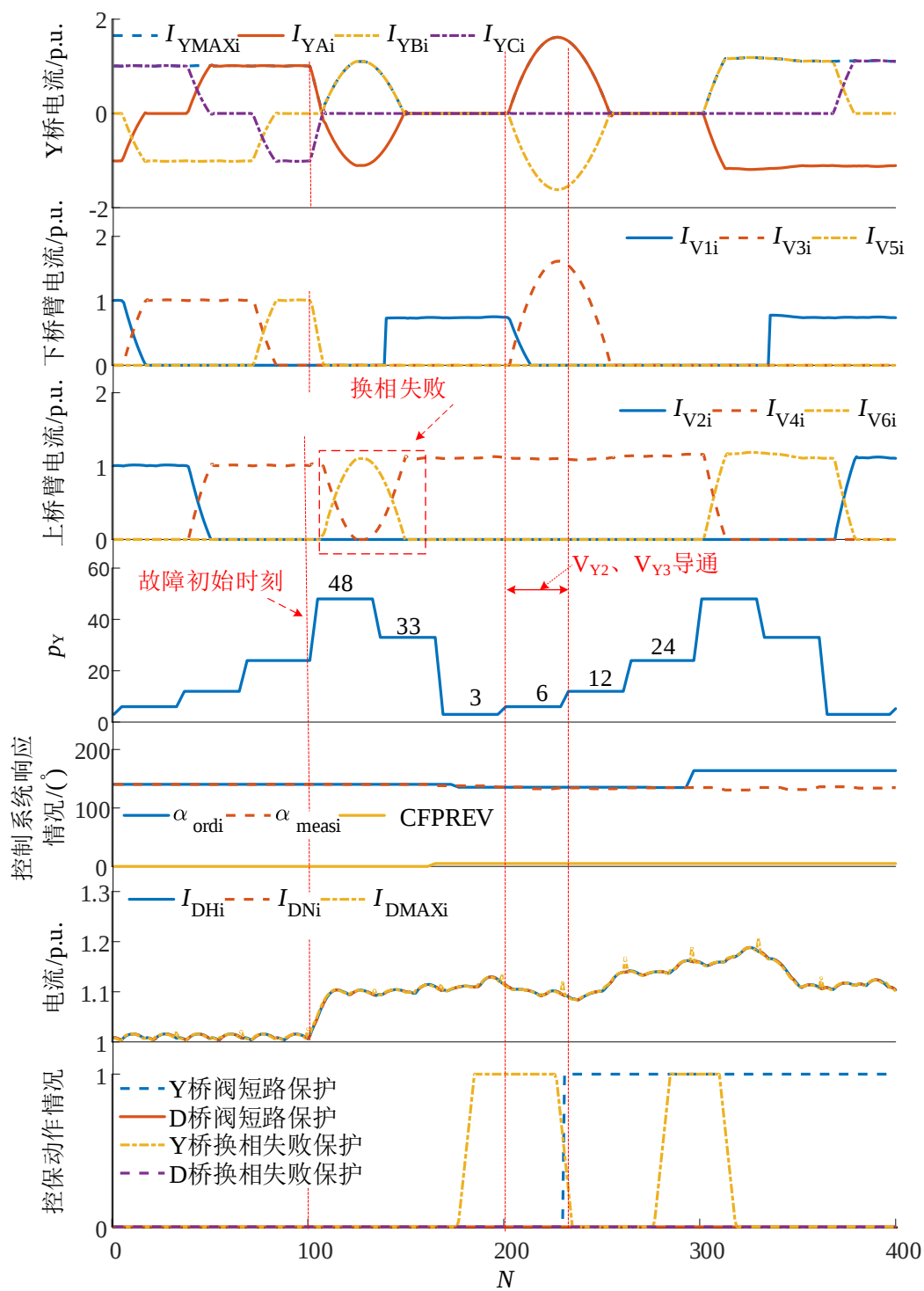


图 A4 换相失败发生后的控保录波

Fig.A4 Control and protection recording wave after commutation failure occurs

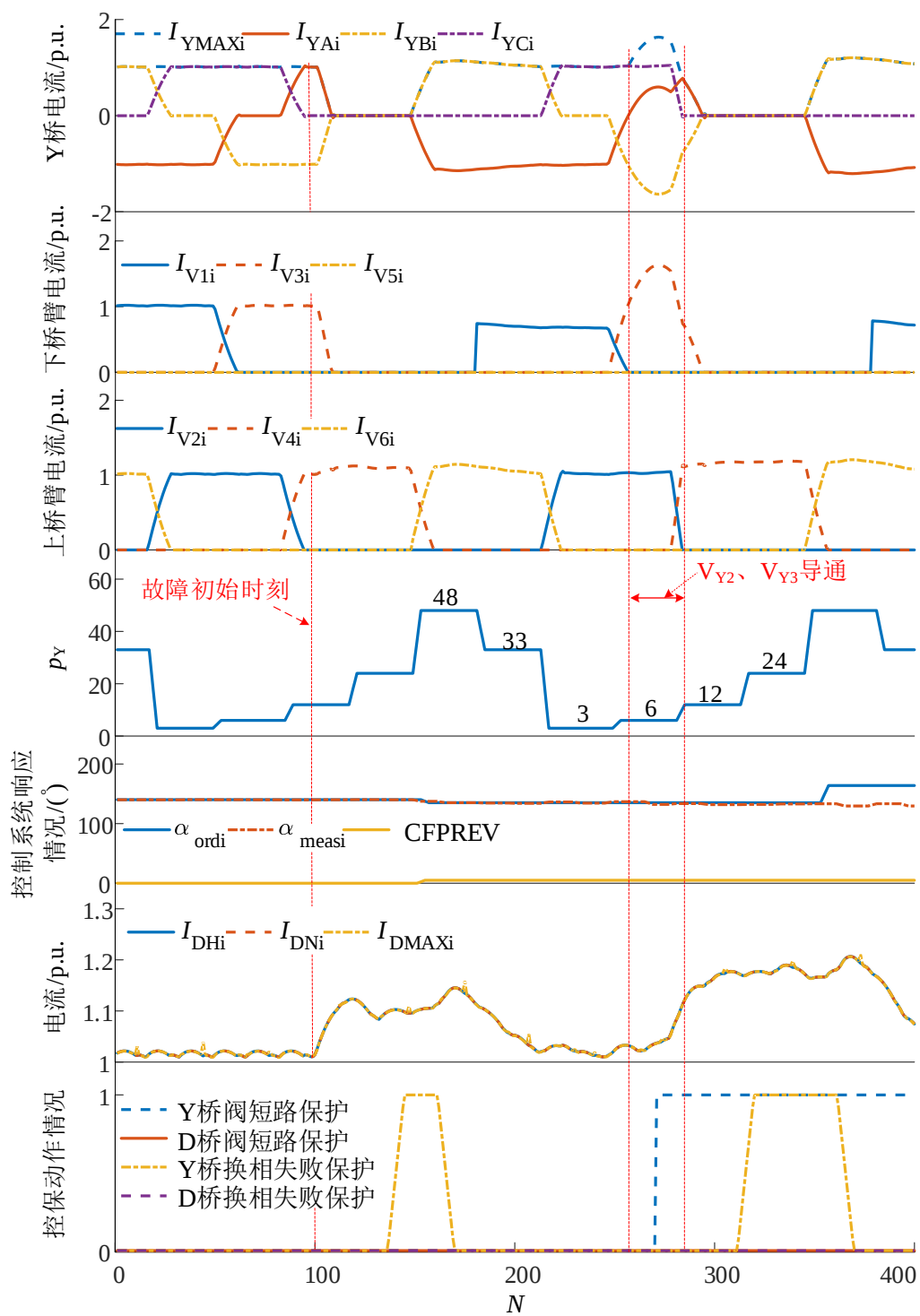


图 A5 无换相失败发生时的控保录波

Fig.A5 Control and protection recording wave without commutation failure

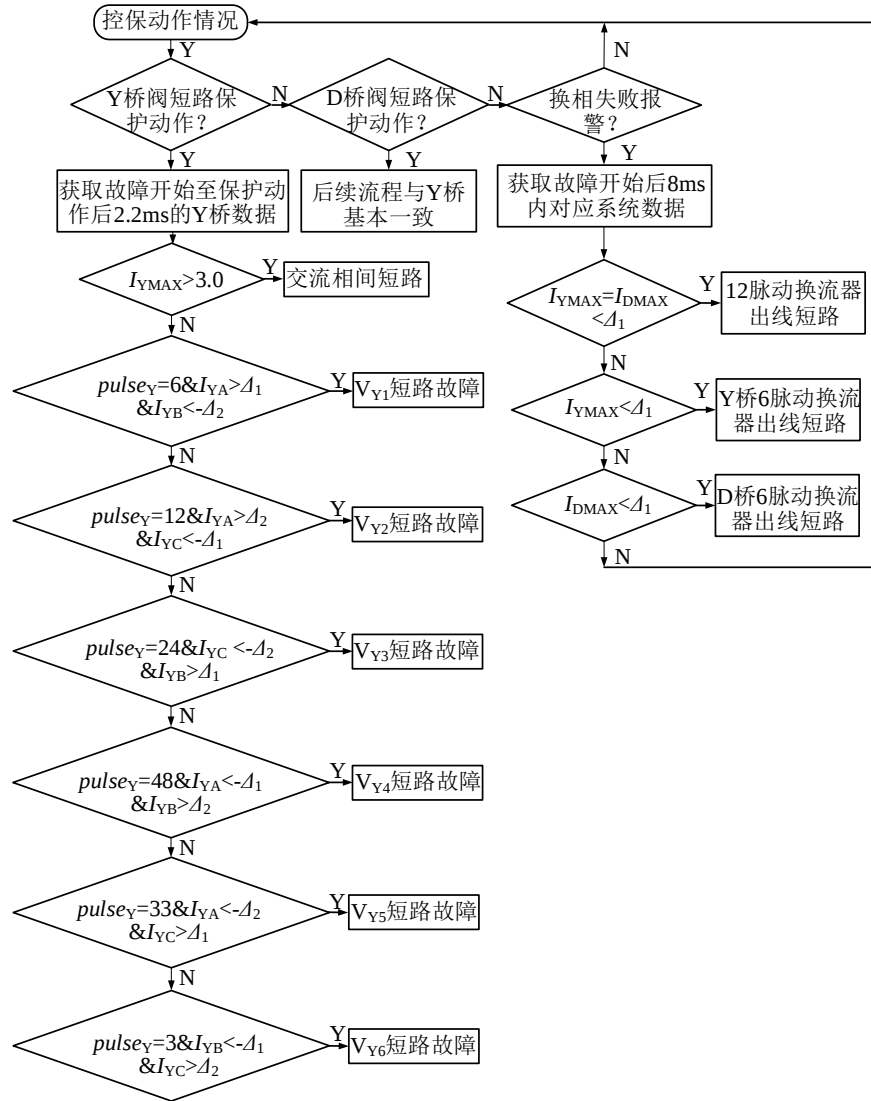


图 A6 逆变侧阀短路故障定位流程图

Fig.A6 Flow chart of short circuit fault location of inverter side valve

各故障位置的故障特征及本文所提方法得到的故障定位结果，如表 A1 所示。表中：
 $VSCP_Y$ 、 $VSCP_D$ 分别为 Y、D 桥阀短路保护动作信号； CFP_Y 、 CFP_D 分别为 Y、D 桥换相失败报警信号； I_{DA} 、 I_{DB} 、 I_{DC} 分别为 D 桥三相电流； $I_{D\text{MAX}}$ 为 D 桥三相电流绝对值的最大值； $K_{Y21} \sim K_{Y26}$ 分别为 Y 桥 $V_{Y1} \sim V_{Y6}$ 桥臂短路故障； $K_{D21} \sim K_{D26}$ 分别为 D 桥 $V_{D1} \sim V_{D6}$ 桥臂短路故障。

表 A1 不同位置阀短路故障的仿真结果

TableA1 Simulative results of valves short circuit faults at different positions

故障位置	故障特征						定位结果	
	VSCP _Y	VSCP _D	CFP _Y	CFP _D	I _{YMAX}	I _{DMAX}		
K _{Y1}	1	0	0	0	0~7.15	——	K _{Y1}	
K _{D1}	0	1	0	0	——	0~7.15	K _{D1}	
K _{Y3}	0	0	1	0	0	——	K _{Y3}	
K _{D3}	0	0	0	1	——	0	K _{D3}	
K ₄	0	0	1	1	0	0	K ₄	
	VSCP _Y	VSCP _D	CFP _Y	CFP _D	I _{YA}	I _{YB}	I _{YC}	
K _{Y21}	1	0	1	0	-0.8~0.73	-0.21~-1.63	——	K _{Y21}
K _{Y22}	1	0	1	0	0.17~1.62	——	0.87~-0.58	K _{Y22}
K _{Y23}	1	0	1	0	——	-0.81~0.32	-0.21~-1.33	K _{Y23}
K _{Y24}	1	0	1	0	-0.32~0.84	0.18~1.34	——	K _{Y24}
K _{Y25}	1	0	1	0	0.27~-1.65	——	-0.78~0.61	K _{Y25}
K _{Y26}	1	0	1	0	——	1.01~-0.63	0~1.61	K _{Y26}
	VSCP _Y	VSCP _D	CFP _Y	CFP _D	I _{DA}	I _{DB}	I _{DC}	
K _{D21}	0	1	0	1	-0.73~0.62	-0.30~-1.64	——	K _{D21}
K _{D22}	0	1	0	1	0~1.65	——	1.02~-0.59	K _{D22}
K _{D23}	0	1	0	1	——	-1.01~0.58	-0.03~-1.63	K _{D23}
K _{D24}	0	1	0	1	1.04~-0.61	0~1.66	——	K _{D24}
K _{D25}	0	1	0	1	-0.28~-1.65	——	-0.75~1.04	K _{D25}
K _{D26}	0	1	0	1	——	0.88~-0.56	0.17~1.05	K _{D26}