

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191319

逆变侧换流变压器网侧接地故障对差动保护影响分析

吴建云¹, 国兴起², 罗美玲¹, 郑涛², 于晓军¹, 黄伟兵¹, 刘海涛³, 梁亚波³, 郑现州²

(1. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001; 2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 3. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750001)

摘要: 特高压直流输电系统逆变侧换流变网侧单相接地故障后, 网侧电压跌落可能会引发直流系统换相失败, 有直流分量流入换流变压器绕组, 使变压器铁芯磁通发生偏移, 引起换流变饱和, 产生故障性涌流, 进而影响其安全稳定运行。针对逆变侧换流变网侧单相接地故障产生的故障性涌流问题, 通过开关函数理论讨论了换流阀正常换相以及换相失败两种情况下网侧故障电流特征, 分析了逆变侧网侧单相接地故障后换流变磁通的变化情况。在此基础上, 研究了电流互感器饱和对换流变差动保护的影响。结果表明, 换流变网侧区内故障情况下, 网侧电流互感器饱和, 使得换流变差动电流二次谐波含量超过阈值, 导致差动保护误闭锁。最后通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证了分析的正确性。

关键词: 换流变压器; 网侧故障; 换相失败; 开关函数; 差动保护

Analysis of influence of grounding fault of the network side of an inverter-side converter transformer on differential protection

WU Jianyun¹, GUO Xingchao², LUO Meiling¹, ZHENG Tao², YU Xiaojun¹, HUANG Weibing¹,
LIU Haitao³, LIANG Yabo³, ZHENG Xianzhou²

(1. State Grid Ningxia Electric Power Limited Company, Yinchuan 750001, China; 2. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 3. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Yinchuan 750001, China)

Abstract: After a single-phase ground fault of the inverter side converter side of a UHV DC transmission system, the voltage drop on the grid side may cause commutation failure of the DC system, such that the DC component flows into the converter transformer winding, and causes the transformer core flux to shift, causing the converter transformer to become saturated, causing a faulty inrush current, which in turn affects its safe and stable operation. In this paper, the problem of fault inrush current is generated for the single-phase ground fault of the inverter side commutation network. The characteristics of the grid side fault current under the two conditions of normal commutation and commutation failure of the converter valve are discussed using the theory of switching function. The variation of commutation flux after a single-phase ground fault on the side of the side network is studied. On this basis, the influence of current transformer saturation on commutation differential protection is studied. The results show that the grid-side current transformer is saturated under the fault condition in the side of the converter network, so that the second harmonic content of the commutating differential current exceeds the threshold value, resulting in differential protection mis-locking. Finally, the correctness of the analysis is verified by PSCAD/EMTDC simulation.

This work is supported by Key Project of Smart Grid Technologies and Equipment of National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGNX0000DKJS1900460).

Key words: converter transformer; network side failure; commutation failure; switching function; differential protection

0 引言

直流输电技术在 20 世纪 50 年代研制成功, 凭

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项资助(2016YFB0900600); 国家电网公司科技项目资助(SGNX0000DKJS1900460)“超/特高压换流变故障性涌流及其对差动保护的影响研究”

借直流输电技术输送距离远、功率大等独特优势, 直流输电技术在国内得到迅速的发展, 促进了直流输电工程的建成与应用^[1]。换流变压器(简称换流变)是交直流混联系统中最主要的设备之一, 具备调节交流电压并使其运行在最佳状态的作用^[2-3], 其可靠性直接影响交直流系统的可靠性。

与换流变阀侧直接相连的换流阀具有单向导通性, 使得在换流变阀侧故障后, 故障电流偏向于

时间轴一侧, 该电流流经换流变, 将改变换流变铁芯工作点, 有可能引起换流变饱和并产生一定大小的励磁涌流, 进而可能导致换流变区内故障时差动保护拒动, 由于其涌流故障引发, 故称其为“故障性涌流”^[4]。换流变压器一般配置差动保护作为电气量主保护, 并附加二次谐波制动判据识别励磁涌流。铁芯饱和产生的故障性涌流可能导致变压器差动保护不能正确动作, 进而影响其安全稳定运行。

目前已有较多文献对交直流混联系统的故障特征进行了研究。文献[5]根据换流阀的通断状态变化, 将逆变侧换流器故障划分为若干不同状态进行分析, 得到逆变侧换流器接地故障时故障电流波形偏于时间轴一侧, 从而有直流电流流入换流变, 但是未讨论直流分量对换流变的影响。文献[6]重点分析 TA 饱和时换相失败对换流变压器差动保护的影响, 认为在逆变侧交流故障导致换相失败情况下, 由于换流阀的单向导通性, 可能会有大量直流电流进入交流系统, 但并未讨论故障电流直流分量对换流变铁芯工作点的影响。文献[7]研究了线路两侧电流互感器传变特性不一致对线路差动保护的影响, 并未分析直流系统中 TA 饱和对换流变差动保护的影响。文献[8-10]研究了逆变侧换流变阀侧单相接地故障, 指出在特定的换相失败条件下会使换流变发生饱和, 但并未分析换流变网侧故障下的故障性涌流特性及其对换流变保护的影响。

本文以±800 kV 特高压直流输电系统为研究对象, 分析了不同故障场景下逆变侧换流变压器网侧接地故障电流特征, 对逆变侧换流变压器网侧接地故障时是否存在故障性涌流展开研究, 进一步分析了计及 TA 饱和时对差动保护的影响。研究表明, 逆变侧换流变压器网侧接地故障不会产生故障性涌流; 但是在逆变侧换流变网侧区内接地故障时, TA 饱和会导致差动保护有误闭锁的风险, 应予以关注。

1 换流变故障性涌流的概念及其特征分析

1.1 换流变故障性涌流

换流变与换流器直接相连, 换流器的各换流阀在一个换相周期内有 6 种不同导通状态, 以 Y0/Y 接线换流变为例, 选取其中一种导通状态, 即与故障相相连的共阴极阀 V_{11} 导通为例, 得到故障期间的短路电流流路径, 如图 1 所示。

在图 1 所示故障场景下, 短路电流流经系统接地极、D 桥换流器共阳极阀、D 桥换流变、D 桥换流器共阴极阀、Y 桥换流器共阳极阀、Y 桥换流变 (A、C 相)、短路点形成回路, 如图 1 所示, 短路回路阻抗小, 短路电流幅值大, 且短路电流流经换流

阀, 由于阀的单向导通性, 导致短路电流位于时间轴上方, 出现直流分量和谐波分量。对于上述 Y/Y 换流变压器, 构成短路回路的 A、C 相网侧、C 相阀侧电流将出现上述故障电流特征。直流分量会导致换流变铁芯产生偏置磁通, 可能导致铁芯进入饱和区域, 进而产生励磁涌流, 为与普通的励磁涌流相区别, 将该励磁涌流现象称为“故障性涌流”^[11]。图 2 所示为由阀侧电流直流分量引起故障性涌流的示意图。

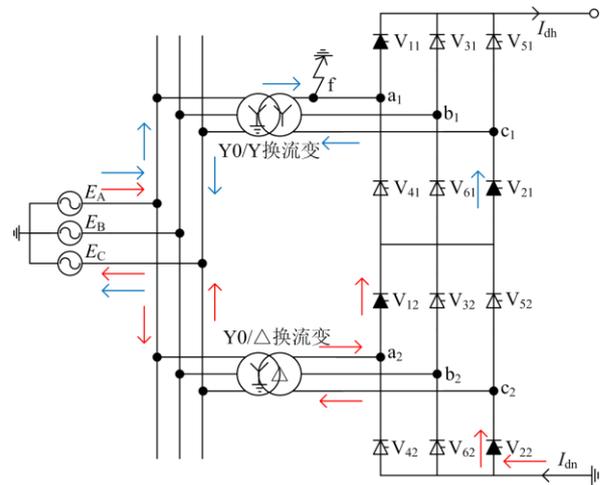


图 1 换流变阀侧接地故障电流分布

Fig. 1 Ground fault current distribution of commutating valve side

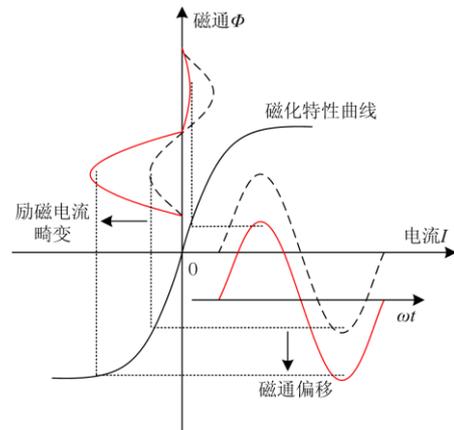


图 2 阀侧电流直流分量引起故障性涌流示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fault current inrush caused by DC component of valve side current

由图 2 可得, 在正常运行时, 换流变铁芯工作在线性区域, 励磁电流幅值较小, 且为上下对称的正弦波; 在换流变阀侧发生接地故障后, 铁芯工作点发生偏移, 并进入饱和区域, 励磁电流波形产生畸变, 产生故障性涌流; 随着换流变饱和程度加深, 故障性涌流幅值增大, 出现间断角。

1.2 故障性涌流特征

以换流变阀侧发生单相接地故障为例，由于换流变铁芯磁通不能突变，在阀侧电流直流分量的影响下，换流变铁芯磁通出现偏置，并逐渐达到饱和磁通，在这一过程中，铁芯磁通的变化会在换流变网侧感应出一定大小的直流电流，由于网侧系统电阻的存在，直流电流将导致换流变端电压产生非周期偏移，从而缩短铁芯进入饱和区的时间，进而加快故障性涌流产生的进程^[12-13]。

以换流变阀侧发生单相接地故障为例，如图 3 所示，其中 i_{r3} 代表阀侧单相接地故障后换流变网侧电流， i_{m3} 代表换流变故障性涌流，故障性涌流在故障发生一段时间之后产生，波形具有间断特征，其波形直流偏置方向与网侧电流直流偏置方向相反，随着换流变铁芯逐渐反向饱和，故障性涌流逐渐反向增大至最大值并维持。对逆变侧来讲，换流变阀侧单相接地故障可能导致换流阀发生换相失败，通过分析发现逆变侧故障相阀侧电流含有较大直流分量，正负半波不对称，且换相失败导致与非故障相相连的共阳极阀导通时间越长，直流分量越大。此外，故障点所处换流器的电压等级越高，故障回路电抗越小，故障后对应换流变阀侧电流的幅值越大，阀侧电流直流含量越高，故障性涌流产生的几率越大且幅值越高。

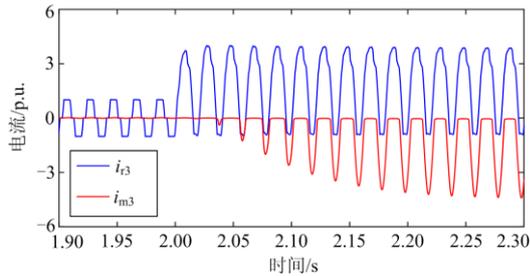


图 3 换流变故障性涌流特征

Fig. 3 Characteristics of commutating fault inrush current

对逆变侧而言，除换流变的阀侧接地故障以外，换流变网侧接地故障后会导致交流母线电压跌落进而产生换相失败现象，同样也会有直流分量注入换流变^[14]，也可能导致换流变饱和产生故障性涌流，下面就此进行具体分析。

2 逆变侧换流变网侧接地故障特征

2.1 基于叠加开关函数法的故障特征分析

当逆变侧网侧发生接地故障时，由于交流侧电压下降，易引发换流器换相失败，针对交流侧电压下降引发的换相失败，目前多采用开关函数法进行分析。换流器的阀臂相当于电力电子开关，当其导

通时相当于逻辑“1”，关断时相当于逻辑“0”，忽略阀的换相过程，可以认为交流电流是直流电流被开关函数调制的结果，流过某一换流阀的电流表达式为

$$i_{Vi} = i_{dc} S_i \quad (1)$$

式中： i_{Vi} 为流入某一换流阀的电流，下标 i 可取 1~6 表示对应的阀； S_i 为各个阀的开关函数； i_{dc} 为换相失败前的直流电流。

以图 4 所示电流正方向为例，流过某一相的电流可认为是相应上、下桥臂的换流阀电流的差值，以 A 相为例，其相电流表达式为

$$i_A = i_{V1} - i_{V4} \quad (2)$$

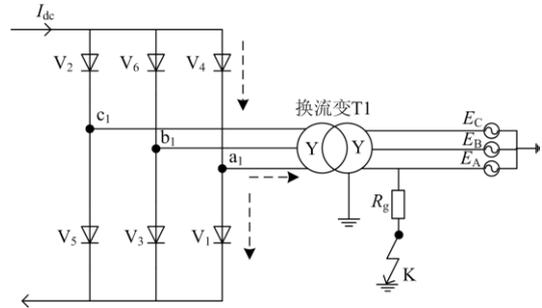


图 4 逆变侧极 I 换流变压器阀侧单相接地故障示意图

Fig. 4 Schematic diagram of valve side single-phase ground fault of inverter side pole I converter transformer

当换流阀发生换相失败以后，根据故障严重程度的不同，故障后各换流阀的导通时间以及换相顺序可能会发生变化，进而其开关函数会有所改变。因此，分析换相失败情况下的换流阀特性时，采用开关函数的改进方法——叠加开关函数法^[15]，即将故障后的开关函数分解为开关函数正常分量及由换相失败引起的开关函数故障分量。以 V_1 发生换相失败为例，可得流入 V_1 电流 i_{V1} 的调制表达式为

$$i_{V1} = (i_{dc} + \sum_{k=1}^{\infty} i_{dck})(S_{1n} + S_{1r}) = \quad (3)$$

$$i_{dc} S_{1n} + \sum_{k=1}^{\infty} i_{dck} S_{1n} + i_{dc} S_{1r} + \sum_{k=1}^{\infty} i_{dck} S_{1r}$$

式中： i_{dc} 为换相失败前的直流电流； i_{dck} 为换相失败引起的直流电流故障分量，包含故障直流分量及各次谐波，下标 k 为谐波次数， $k=0,1,L$ ； S_{1n} 为 V_1 正常情况下的开关函数； S_{1r} 为 V_1 由换相失败引起的开关函数故障分量。

比较式(1)、式(3)可知， V_1 发生换相失败后，阀电流中增加 $\sum_{k=1}^{\infty} i_{dck} S_{1n} + i_{dc} S_{1r} + \sum_{k=1}^{\infty} i_{dck} S_{1r}$ 分量，由于

故障后 V_1 的导通区间增大, 因此上述分量均与正常分量极性相同, 故障后 V_1 阀电流直流分量增大。以 A 相为例, 由式(3)可得, 其相电流表达式为

$$i_A = i_{V_1} - i_{V_4} = i_{dc}(S_{1n} - S_{4n}) + \sum_{k=1}^{\infty} i_{dck}(S_{1n} - S_{4n}) + i_{dc}(S_{1r} - S_{4r}) + \sum_{k=1}^{\infty} i_{dck}(S_{1r} - S_{4r}) \quad (4)$$

对式(4)进行进一步化简有式(5)。

$$i_A = i_{dc}S_{An} + \sum_{k=1}^{\infty} i_{dck}S_{An} + i_{dc}S_{Ar} + \sum_{k=1}^{\infty} i_{dck}S_{Ar} = i_{dc}S_{An} + \sum_{k=1}^{\infty} i_{dck}S_{An} + i_{dcf}S_{Ar} \quad (5)$$

式中: S_{An} 表示正常情况下的 A 相开关函数; S_{Ar} 表示由换相失败引起的 A 相开关函数故障分量; i_{dcf} 为换相失败发生后的直流电流, 包含正常分量及故障分量, 写作 $i_{dcf} = i_{dc} + \sum_{k=1}^{\infty} i_{dck}$, 其他变量同上。

S_{An} 一周期内正负对称, 因此直流分量为 0, 换相失败发生后, 若故障开关函数分量 S_{Ar} 不满足对称关系, 则 A 相电流中将含有较大的直流分量注入交流系统, 可能使换流变饱和。下文将结合逆变侧网侧单相接地故障的具体情况, 利用叠加开关函数法, 对换流变在故障后的饱和及故障性涌流产生情况进行分析。

2.2 网侧故障换流变饱和情况分析

以 ±800 kV 高压直流输电中逆变侧极 I 高压 Y 桥换流变 T1 发生网侧单相接地故障为例进行分析, 故障点 K 如图 4 所示。当网侧单相接地故障发生时, 若电压跌落严重(如金属性接地故障), 则换相失败极易发生; 若电压跌落程度轻微(如经过渡电阻接地), 则发生换相失败的概率降低^[16-17]。下文分别针对图 4 所示故障点 K 发生经过渡电阻短路未引发换相失败、金属性短路引发换相失败情况下换流变的饱和情况进行分析。

2.2.1 不计及换相失败时换流变饱和情况分析

假设极 I 高压阀组 Y 桥换流变 T1 网侧发生经过渡电阻接地短路, 故障发生前 V_1 和 V_2 导通, 图 5 所示为此时的故障电流流通图, 以 A 相为例, 假设此时换流阀不会发生换相失败, V_1 、 V_4 开关函数故障分量 $S_{1r} = S_{4r} = 0$, 根据式(5), A 相电流如式(6)所示。

$$i_A = i_{dc}(S_{1n} - S_{4n}) + \sum_{k=0}^{\infty} i_{dck}(S_{1n} - S_{4n}) = \left(i_{dc} + \sum_{k=0}^{\infty} i_{dck} \right) S_{An} \quad (6)$$

式中, S_{An} 与式(5)中含义相同, 为 A 相电流开关函数正常分量, 一周期内正负对称, 直流分量为 0, 因此该场景下, 流入换流变的直流分量为零, 换流变不会发生饱和。

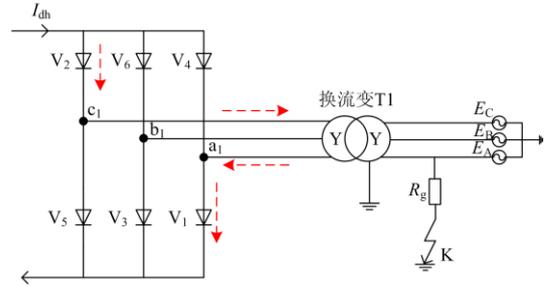


图 5 V_1 和 V_2 导通时直流分量流通图

Fig. 5 DC component flow diagram when V_1 and V_2 are on

2.2.2 计及换相失败时换流变饱和情况分析

假设 V_1 和 V_2 导通时发生金属性接地故障 ($R_g=0$), 此时交流系统电压跌落程度较重, 该场景下 V_1 向 V_3 换相时将发生换相失败^[18-21]。根据式(5):

$$i_A = i_{dc}S_{An} + \sum_{k=1}^{\infty} i_{dck}S_{An} + i_{dcf}S_{Ar}$$

由于 A 相电流开关函数正常分量 S_{An} 一周期内直流分量为 0, 换相失败后换流变 A 相阀侧绕组电流中故障直流分量的大小主要取决于流入换流变的故障分量 i_{dcf} 的大小以及开关函数故障分量 S_{Ar} 。下面分别分析换相失败后 i_{dcf} , S_{Ar} 的特征。

换相失败发生后, V_1 持续导通, 而非故障相相连的 V_2 换相电压不变可以正常换相, 随着 V_2 向 V_4 的换相, V_1 和 V_4 同时导通形成直流通路, 如图 6 所示, 蓝色虚线为故障前阀电流流路径, 红色实线为换相失败后阀电流流路径, 换相失败导致故障电流大部分经直流通路流入极 I 高压阀组 D 桥, 少量流经 T1 换流变, 即流入换流变的故障电流 i_{dcf} 极小。

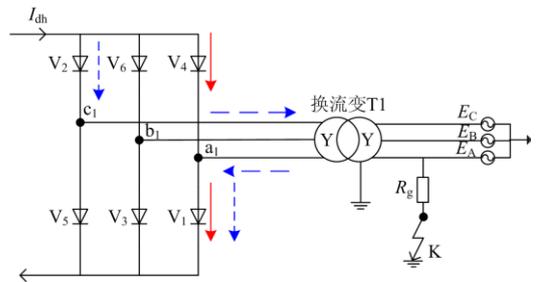


图 6 换相失败时直流分量流向图

Fig. 6 DC component flow diagram when commutation fails

换相失败导致 V_1 、 V_4 连续导通时的开关函数特性如图 7 所示。图 7(a)中 S_{V_1} 代表故障后 V_1 开关

函数, S_{1n} 代表 V_1 正常情况下的开关函数, S_{1r} 代表 V_1 开关函数故障分量, 同理图 7(b)中 S_{V4} 、 S_{4n} 、 S_{4r} 为 V_4 相应的开关函数分量, 图 7(c)中 $S_{Ar} = (S_{1r} - S_{4r})$ 为 A 相开关函数故障分量。如图 7(c)所示, 当网侧接地故障导致 V_1 、 V_4 持续导通时, A 相开关函数故障分量 S_{Ar} 呈现正负半波对称的现象。

综合上述分析, 换相失败发生后, 流入换流变的故障分量 i_{def} 极小, 且 A 相开关函数故障分量 S_{Ar} 呈现正负半波对称的现象, 那么 i_A 中 $i_{def} S_{Ar}$ 分量正负对称且幅值较小, 一周期内直流分量为 0, 因此网侧故障导致换相失败后不会有直流分量注入换流变, 换流变亦不会发生饱和, 即不会有故障性涌流现象发生。

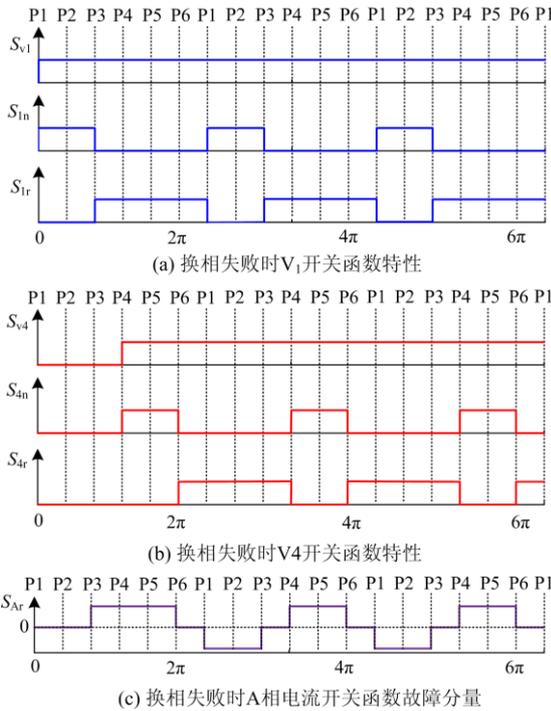


图 7 换相失败时电流开关特性

Fig. 7 Current switching characteristics when commutation fails

故障发生于其他阀导通时的分析与 V_1 、 V_2 导通时发生故障类似, 同样不能使换流变发生饱和, 这里不再赘述。

2.3 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 仿真平台中搭建如图 4 所示的 ± 800 kV 直流输电系统仿真模型。仿真模型参数如表 1 所示。分别对换流变 T1 网侧 A 相经过渡电阻接地短路和 A 相金属性接地短路进行仿真分析。

2.3.1 网侧 A 相经过渡电阻接地短路仿真

图 8 为网侧金属性接地故障且不发生换相失败

表 1 仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters	
参数	数值
额定容量/MW	760
额定变比/kV	525/170
联接方式	Y0/Y
饱和点/p.u.	1.25
换流变压器等值电抗/p.u.	0.18
过渡电阻	70
TA1 变比	1/187
TA2 变比	1/600

时 V_1 、 V_4 的开关函数波形, 与正常情况下的开关函数波形完全相同, 因此不发生换相失败时 V_1 、 V_4 的开关函数故障分量 S_{1r} 、 S_{4r} 为 0, 没有直流分量流入换流变, 与 2.2 节分析相符。图 9 为换流变 T1 网侧 A 相经过渡电阻接地短路时 A 相换流变磁通波形, 故障发生在 0.39 s, 由图 9 可知, 由于交流侧电压跌落, 换流变磁通幅值明显减小, 直流分量在过渡电阻的影响下迅速衰减为 0, 换流变不会发生饱和, 不会有故障性涌流产生, 对差动保护没有影响。

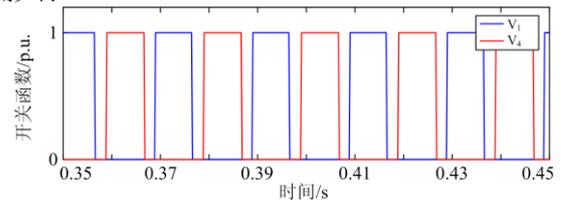


图 8 不发生换相失败时 V_1 、 V_4 正常开关函数

Fig. 8 V_1 and V_4 normal switching function when commutation failure does not occur

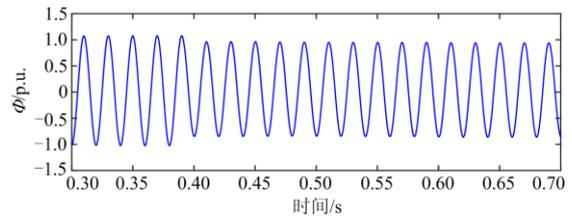


图 9 网侧 A 相经过渡电阻接地短路下换流变磁通

Fig. 9 Network side A phase through the transition resistance ground short circuit under the commutating flux

2.3.2 网侧 A 相金属性接地短路仿真

对网侧 A 相金属性接地短路故障进行仿真分析, 故障发生于 0.39 s, 此时 V_1 和 V_2 处于导通状态, 故障发生后 V_1 到 V_3 换相失败, 而 V_2 到 V_4 能够正常换相。图 10 为极 I 高压阀组 Y 桥换流阀电流, 其中蓝红黄分别为 V_1 、 V_2 和 V_4 波形, 图 11 为 V_1 、 V_4 的开关函数特性。

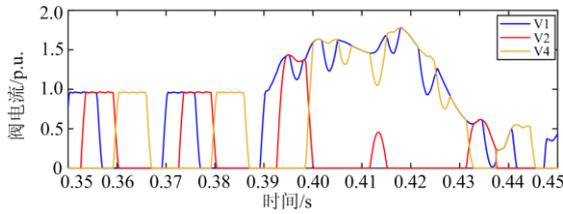


图 10 换流器阀电流

Fig. 10 Inverter valve current

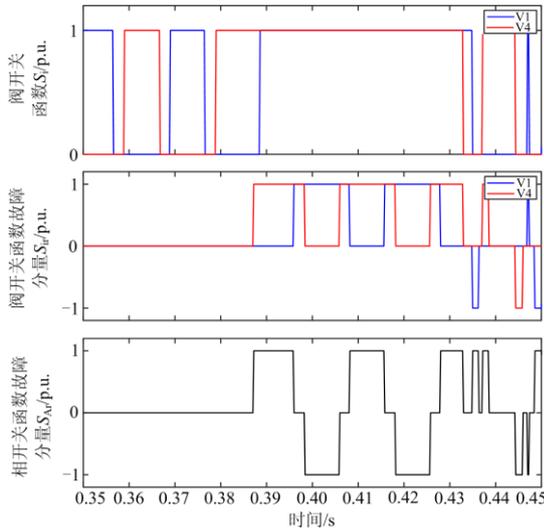


图 11 换相失败时 V₁、V₄ 的开关函数

Fig. 11 Switching function of V₁ and V₄ when commutation fails

由图 10 可见故障发生后 V₁ 和 V₄ 均持续导通, 形成直流通路, 仅有较小的电流流入换流变阀侧, 即换相失败后注入换流变的故障电流 i_{dcf} 极小。此外, 由图 11 可知发生换相失败后 V₁ 与 V₄ 开关函数大致相同, 由于 V₁ 与 V₄ 相位差的存在, 导致换相失败后换流变 A 相电流开关函数故障分量 S_{Ar} 呈现正负半波对称的现象, $i_{dcf} S_{Ar}$ 一周期内直流分量为 0, 没有直流分量流入换流变, 因此不会使换流变发生饱和。图 12 为金属性接地短路后换流变 A 相磁通波形图, 可见发生金属性接地故障后, 网侧电压跌落导致换流变故障相磁通大小几乎为零, 换流变不会产生故障性涌流, 对换流变差动保护没有影响。

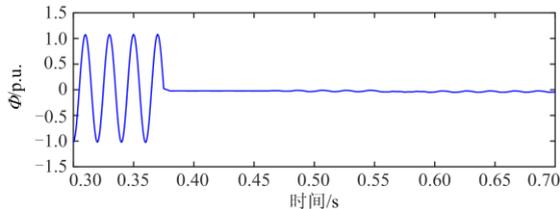


图 12 网侧 A 相金属性接地短路下换流变磁通

Fig. 12 Commutating flux under network side A phase metal ground short circuit

综上所述, 逆变侧换流变网侧接地故障后故障特征如下:

1) 极 I 高压阀组 Y 桥换流变 T1 网侧发生 A 相网侧接地故障但不发生换相失败情况下, 故障相交流母线电压幅值下降, 故障相换流变磁通幅值降低, 并且由于正常换相没有直流分量流入换流变, 换流变不会发生饱和, 不会产生故障性涌流。

2) 极 I 高压阀组 Y 桥换流变 T1 网侧发生 A 相接地故障伴随换相失败情况下, 故障相桥臂形成直流通路导致仅有较小的故障电流流入换流变, 通过开关函数分析得出由于换相失败, 流入换流变的故障电流中可能含有较大直流分量的部分为正负半波对称的, 不会使换流变饱和, 换流变不会产生故障性涌流。

上述分析中均未考虑 TA 饱和影响, 逆变侧换流变网侧接地故障导致换相失败期间有较大的交流网侧电流流过网侧 TA, 其含有一定的直流分量可能会导致 TA 饱和, 进而对换流变的差动保护产生影响, 因此, 下面就计及 TA 饱和情况下的网侧故障对换流变差动保护的影响进行分析。

3 网侧故障对换流变差动保护的影响

基于 ±800 kV 直流输电系统仿真模型, 以 Y0/Y 型接线换流变 T1 为例, 图 13 给出了其 TA 布置图, 图中 F1 为换流变内部故障点, F2 为外部故障点, TA1、TA2 分别为换流变阀侧和网侧 TA, 均以故障程度最严重的金属性接地故障为例进行分析。

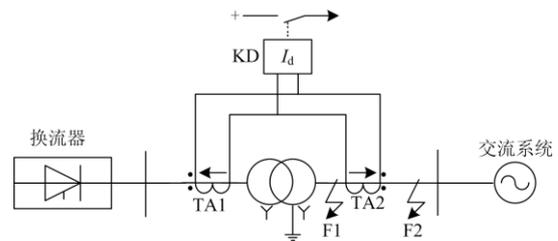


图 13 换流变 TA 及故障点布置图

Fig. 13 Converter change TA and fault point layout

3.1 换流变网侧区外 A 相接地故障

图 14 给出了 0.39 s 时 F2 处发生 A 相金属性接地故障引发换相失败情况下, TA 1 两侧电流波形 (电流均已折算至一次侧, 下同)。对于换流变差动保护来讲, 网侧区外故障为穿越性故障, 若两侧 TA 正常传变, 则差流为 0。由 2.2 节分析可知流入换流变的 i_A 中 $i_{dcf} S_{Ar}$ 分量正负对称且幅值较小, 一周期内直流分量为 0, 不会有直流分量注入 TA1、TA2,

因此 TA1、TA2 均不会发生饱和，仍能正确传变其一次侧电流。TA2 电流波形图与 TA1 完全相同，故障后换流变差流如图 15 所示，接近于 0。因此，区外故障情况下，换流变两侧 CT 均能正常传变，差动保护不动作。

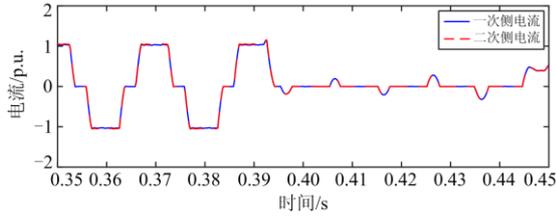


图 14 区外故障时 TA1 两侧电流波形

Fig. 14 Current waveform on both sides of TA1 when the fault occurs outside the area

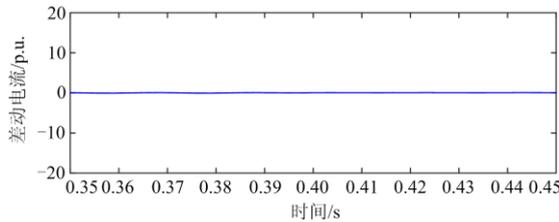


图 15 网侧区外故障差动电流

Fig. 15 Differential current of network side area fault

3.2 换流变网侧区内 A 相接地故障

图 16 为 0.39 s 发生 A 相金属性接地区内故障 F1 时 TA2 两侧电流波形图。区内故障时流过 TA2 的电流主要是由等值交流电源所提供的，含有较大的非周期分量(如图 16 中蓝线所示)，从而导致 TA2 发生饱和，TA2 的幅值和相角的传变都出现了较大误差，TA2 已经不能正确传变其一次侧电流(如图 16 中红色虚线所示)。对于 TA1 来说，换流变区内 F1 故障与区外 F2 故障流过的故障电流相同，如上节所述，不会发生饱和。

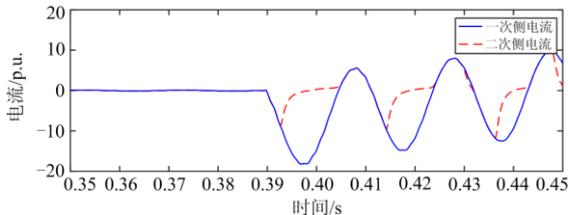


图 16 区内故障时 TA2 两侧电流波形图

Fig. 16 Current waveform of TA2 on both sides of internal fault

图 17 给出了与图 16 相同故障场景下 TA2 的 B-H 曲线。通过图 17 可以看出 TA2 发生了饱和现象^[22-24]。

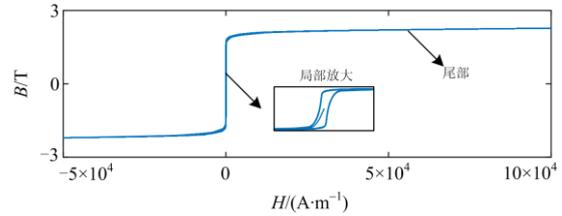


图 17 区内故障时 TA2 的 B-H 曲线

Fig. 17 B-H curve of TA2 of internal fault

通过本节分析可以看出，区内故障伴随换相失败时对 TA 传变特性的影响主要是由于大量直流分量造成 TA 发生了暂态饱和，并且由于流经换流变两侧 TA 的直流分量不相同，因此换相失败对换流变两侧 TA 的传变特性影响也不尽相同，会对换流变差动保护产生不利影响。

图 18 为区内单相金属性接地故障(F1)时故障相差动电流及其二次谐波比。由图 18 可以看出，故障相差动电流在故障期间显著增大，高于保护动作值，但二次谐波比远大于一般的整定值 15%，因此带有二次谐波制动环节的差动保护误闭锁，换流变差动保护拒动。针对此问题，可以从两方面进行解决：一方面通过引入时差法来提高保护判据性能^[25]；另一方面可以将两侧传统电磁式电流互感器替换为光学电流互感器^[26](OCT)或电子式电流互感器(ECT)，可以解决因 TA 饱和导致的差动保护拒动问题。

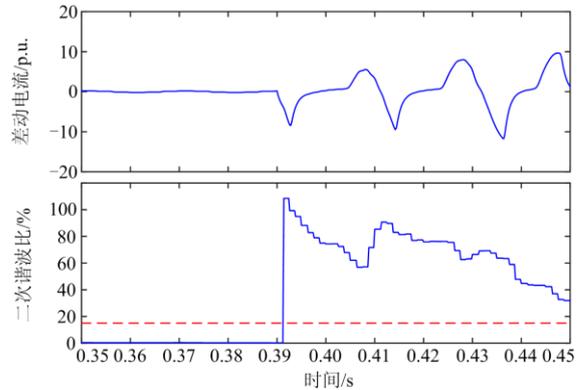


图 18 内部故障时换流变差动电流及二次谐波比

Fig. 18 Converter commutating differential current and second harmonic ratio of internal fault

4 结论

本文以±800 kV 特高压直流输电系统为研究对象，分析了不同故障场景下逆变侧换流变压器网侧接地故障电流特征，对逆变侧换流变压器网侧接地故障时是否存在故障性涌流展开研究，进一步分析了计及 TA 饱和时对差动保护的影响，结论如下：

1) 在不考虑 TA 饱和的情况下, 逆变侧换流变发生网侧单相接地故障后, 无论是否发生换相失败, 换流变都不会发生饱和, 不会有故障性涌流产生, 对差动保护没有影响。

2) 考虑 TA 饱和的情况下, 当换流变网侧发生区内故障时, 网侧电流含有较大的非周期分量, 使得网侧 TA 发生饱和, 导致差动电流二次谐波含量升高, 使差动保护误闭锁, 对交直流混联系统正常运行产生不利影响。

参考文献

- [1] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.
- [2] 朱韬析, 王超. 天广直流输电换流变压器保护系统存在的问题[J]. 广东电力, 2008, 21(1): 7-10.
ZHU Taoxi, WANG Chao. Problems existing in protective system of converter transformer used in Tian-Guang HVDC Project[J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21(1): 7-10.
- [3] 翁汉琨, 林湘宁. 换流变压器差动保护异常动作行为分析及对策[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 87-94.
WENG Hanli, LIN Xiangning. Analysis and countermeasure of abnormal operation behaviors of the differential protection of converter transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 87-94.
- [4] ZHENG Tao, GUO Xingchao, HU Xin, et al. Research on the fault-induced inrush current of the converter transformer and its impacts[C] // 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), October 20-22, 2018, Beijing, China: 1-6.
- [5] 李晓华, 刘洋, 蔡泽祥. 直流输电换流变压器阀侧交流单相接地故障[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 38-45.
LI Xiaohua, LIU Yang, CAI Zexiang. Analysis of grounding fault at HVDC converter transformer valve side[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 38-45.
- [6] 赵彤, 吕明超, 娄杰, 等. 多馈入高压直流输电系统的异常换相失败研究[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 705-711.
ZHAO Tong, LÜ Mingchao, LOU Jie, et al. Analysis on potential anomalous commutation failure in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 705-711.
- [7] ZHENG Tao, HUANG Ting, MA Yulong, et al. Histogram-based method to avoid maloperation of transformer differential protection due to current-transformer saturation under external faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 610-619.
- [8] 郑涛, 胡鑫. 特高压换流变故障性涌流产生机理及其对差动保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 109-115.
ZHENG Tao, HU Xin. Fault inrush current mechanism of UHV converter transformer and its impacts on differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 109-115.
- [9] 荆勇, 欧开健, 任震. 交流单相故障对高压直流输电换相失败的影响[J]. 高电压技术, 2004, 30(3): 60-62.
JING Yong, OU Kaijian, REN Zhen. Analysis on influence of AC single phase faults on HVDC commutation failure[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(3): 60-62.
- [10] 李兴源. 高电压直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [11] 郑涛, 国兴超, 胡鑫, 等. 逆变侧换流变压器故障性涌流产生机理及其对差动保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 39-45.
ZHENG Tao, GUO Xingchao, HU Xin, et al. Mechanism of fault inrush current of inverter-side converter transformer and its influence on differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 39-45.
- [12] 吴梓亮, 曾耿晖, 李一泉, 等. 基于双门阈值的变压器 Hausdorff 距离快速保护新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 128-135.
WU Ziliang, ZENG Genghui, LI Yiquan, et al. A novel criterion for fast protection of transformer based on Hausdorff distance and double threshold[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 128-135.
- [13] DENG Yujia, LIN Sheng, FU Ling, et al. New criterion of converter transformer differential protection based on wavelet energy entropy[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 980-990.
- [14] 李子林. 高压直流输电锁相环研究与开关函数建模[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
LI Zilin. Research on HVDC phase-locked loop and modelling of switch function[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [15] 李子林, 汪娟娟, 李瑶佳, 等. 基于实际换相电压过零点的高压直接换流器开关函数建模[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5389-5398.
LI Zilin, WANG Juanjuan, LI Yaojia, et al. A switching function model of hvdc converters based on actual zero crossing points of commutating voltages[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5389-5398.
- [16] 刘建, 李兴源, 吴冲, 等. HVDC 系统换相失败的临界

- 指标[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 8-12.
- LIU Jian, LI Xingyuan, WU Chong, et al. Research on critical index of commutation failure in HVDC systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 8-12.
- [17] 申洪明, 黄少锋, 费彬. HVDC 换相失败暂态特性及其对差动保护的影响分析和对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 109-114, 120.
- SHEN Hongming, HUANG Shaofeng, FEI Bin. Transient characteristic of HVDC system during commutation failure and its effect on differential protection and countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 109-114, 120.
- [18] ZHOU Zexin, CHEN Zhengguang, WANG Xingguo. AC fault ride through control strategy on inverter side of hybrid HVDC transmission systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(5): 1129-1141.
- [19] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败判断标准的仿真分析[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 20-24.
- HE Chaorong, LI Xingyuan, JIN Xiaoming, et al. Simulation analysis on commutation failure criteria for HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 20-24.
- [20] 安群涛, 孙力, 赵克, 等. 基于开关函数模型的逆变器开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 1-6.
- AN Quntao, SUN Li, ZHAO Ke, et al. Diagnosis method for inverter open-circuit fault based on switching function model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(6): 1-6.
- [21] MENDES A M S, CARDOSO A J M. Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives by the average current Park's vector approach[C] // IEEE International Electric Machines and Drives Conference, May 9-12, 1999, Seattle, WA, USA.
- [22] KRISHNAMURTHY S, BANINGOBERA B E. IEC61850 standard-based harmonic blocking scheme for power transformers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 121-135. DOI: 10.1186/s41601-019-0123-7.
- [23] 张国辉, 李志中, 王宾, 等. 基于 Adaboost 的高压直流线路连续换相失败预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 69-77.
- ZHANG Guohui, LI Zhizhong, WANG Bin, et al. Early warning method of HVDC line continuous commutation failure based on Adaboost algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 69-77.
- [24] 饶宇飞, 张鹏辉, 李程昊, 等. 励磁涌流对高压直流输电系统换相失败的影响机理及评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 54-61.
- RAO Yufei, ZHANG Penghui, LI Chenghao, et al. Mechanism and evaluating method for HVDC commutation failure caused by inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 54-61.
- [25] 谷君, 郑涛, 肖仕武, 等. 基于时差法的 Y/△接线变压器和应涌流鉴别新方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 6-11.
- GU Jun, ZHENG Tao, XIAO Shiwu, et al. A new algorithm based on time differential method to identify sympathetic inrush of transformers connected in wye-delta mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13): 6-11.
- [26] 王谦, 陆宇航, 刘勇, 等. 光学互感器在智能变电站的应用现状与发展前景[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(12): 89-95.
- WANG Qian, LU Yuhang, LIU Yong, et al. Application status and development prospect of optical transformer in smart substation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(12): 89-95.

收稿日期: 2019-10-25; 修回日期: 2020-02-21

作者简介:

吴建云(1986—), 男, 高级工程师, 研究方向为电网继电保护; E-mail: dkzxbhc@163.com

国兴起(1996—), 男, 通信作者, 研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: guoxc1996@163.com

罗美玲(1982—), 女, 高级工程师, 研究方向为电网继电保护。E-mail: 693400664@qq.com

(编辑 周金梅)