

DOI:10.11784/tdxbz202412016

# LCC-HVDC 系统换流变压器阀侧单相接地保护的研究

张艳霞, 魏 乐

(智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

**摘要:** 换流器工作的非线性使得电网换相换流器型高压直流(LCC-HVDC)输电系统换流变压器阀侧绕组故障后的电流随着阀导通及换相而变化, 实际工程中曾出现阀侧绕组单相接地故障后差动保护拒动情况. 研究了换流变压器单相接地的分析方法和故障特性, 并依据故障特性分析了差动保护及零序过流保护的動作性能, 提出一种换流变压器接地保护新方案. 首先, 采用时段划分法将故障后 1 个工频周期划分为 12 个时段, 依据共同点对时段进行归类并按类分析了故障特性, 将多时段合并得到故障后 1 个工频周期的网侧电流和阀侧电流表达式. 然后, 采用全波傅里叶算法计算差动电流及零序电流中的基波及各次谐波幅值, 结果表明: 由于低压桥换流变压器阀侧绕组单相接地后基波严重畸变, 差动保护会因 2 次谐波含量大于 15% 而闭锁、零序过流保护因基波幅值小于整定值而拒动. 为此, 利用零序电流中 2~6 次谐波占比均大于 15% 反映这种故障, 其与差动保护及零序过流保护互为补充, 能提高换流变压器的保护性能. 最后, 搭建仿真模型验证了保护方案的有效性.

**关键词:** 换流变压器; 阀侧绕组单相接地; 差动保护; 零序过流保护; 谐波占比; 接地保护

中图分类号: TM721

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)11-1107-17

## Research on Single-Phase Grounding Protection on the Valve Side of Converter Transformers in LCC-HVDC System

Zhang Yanxia, Wei Le

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Because of the nonlinear operation of the converter, the valve-side winding current of the converter transformer in a line-commutated converter high-voltage direct current (LCC-HVDC) system changes with valve conduction and commutation. In practical engineering, differential protection refuse-acting after single-phase grounding of the valve-side winding had occurred. In this paper, the analysis method and fault characteristics of single-phase grounding of converter transformers were investigated, the performance of differential protection and zero-sequence overcurrent protection was analyzed, and a new scheme for grounding protection of converter transformers was proposed. First, the time period division method was used to divide a power frequency cycle after a fault into 12 periods, and the time periods were classified according to their commonalities. The fault characteristics were analyzed based on the classification results, and the grid-side and valve-side current expressions of the cycle after a fault were obtained by merging multiple time periods. Then, the full-wave Fourier algorithm was utilized to calculate the fundamental and harmonic amplitudes in the differential and zero-sequence currents. Given the serious fundamental distortion after the valve-side winding single-phase grounding of the low-voltage bridge converter transformer, the differential protection will be blocked because the second harmonic is greater than 15%, and the zero-sequence overcurrent protection will be refuse-acting because the fundamental amplitude is less than the setting value. The proposed scheme reflects that the proportions of faults with second, third, ..., sixth harmonics in zero-sequence current are all greater than 15%, which is complementary to differential protection and zero-sequence overcurrent protection and

收稿日期: 2024-12-16; 修回日期: 2025-04-06.

作者简介: 张艳霞(1962—), 女, 博士, 教授, zyx1962@tju.edu.cn.

通信作者: 魏 乐, 15227039236@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点资助项目(U23B20112).

Supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (No. U23B20112).

can improve the protection performance of converter transformers. A simulation model is built to verify the effectiveness of the protection scheme.

**Keywords:** converter transformer; valve-side winding single-phase grounding; differential protection; zero-sequence overcurrent protection; harmonics proportion; grounding protection

换流变压器是电网换相换流器型高压直流(line commutated converter high-voltage direct current, LCC-HVDC)输电系统的重要设备,其主要功能包括:为 12 脉动换流器提供相位相差  $30^\circ$  的交流电压;与换流阀一起实现交直流变换;其阻抗较大可限制故障电流.换流变压器的主保护是纵联电流差动保护,原理上能反映区内发生的相间故障和接地故障,且其带有的谐波制动能有效防止励磁涌流时误动作;换流变压器的接地后备保护是零序过流保护.实际中,由于换流变压器阀侧绕组直接与换流器相联,当阀侧绕组单相接地时故障特性与普通变压器不同,具有非线性工作特性的换流器使得阀侧绕组中含有大量谐波分量,有可能造成纵联电流差动保护和零序过流保护的拒动<sup>[1-2]</sup>.即使配置阀侧绕组差动保护,也不能保证阀侧绕组接地 100% 动作,因为当阀侧绕组引出线上高阻单相接地时,绕组差流很小,该保护不能反应.因此,深入研究换流变压器单相接地的故障特征,分析保护动作性能,研究提出新原理的接地保护对于保障电力系统的安全运行具有重要的理论意义和实用价值.

文献[3]利用 PSCAD/EMTDC 搭建单极大地运行方式的特高压直流输电系统模型,对换流变压器阀侧的单相接地、相间短路和阀短路进行的仿真研究结果表明:阀侧绕组单相经过渡电阻接地后短路电流正负半波不对称导致铁芯半周饱和,差动电流中谐波含量较大,换流变压器差动保护中防止励磁涌流情况下误动的 2 次谐波制动回路存在因 2 次谐波含量高误动作的风险,从而引起差动保护误闭锁.但所得结果主要依赖仿真,也没有提出解决方案.文献[4]基于故障发生时的阀状态建立换流变压器阀侧绕组单相接地的等值电路,分析故障电流特征,所得结论与文献[3]相同.在此基础上利用阀侧三相电流和作为补充判据优化了传统差动保护.然而,阀导通状态在一个工频周期内的变化使得不同时刻短路的故障特征不同,该文没有具体分析.文献[5]在考虑直流系统控制作用及换流器状态的基础上,基于回路叠加法建立了阀侧绕组单相接地的故障分析电路,并分析了换流器的电气量特征及保护的動作特性,文献[6]指出故障位置、故障发生时刻对阀侧绕组单相接地故障特征影响较大,给出了故障发生时刻的特征时段划分依据及划分情况,从阀工况的层面分析了故障后换流器的暂

态过程.但文献[5-6]主要分析的是换流器的相关电气量特征,而均未分析换流变压器的相关电气量特征.文献[7]从磁链变化角度分析了阀侧绕组单相接地后由于阀的单相导通性而引起的“故障性涌流”的产生机理和特点,得到换流变压器发生区外转区内的转换性故障时差动保护存在误闭锁风险的结论,并提出一种基于差动电流中直流分量符号的差动保护改进方案,但未定量求解差动电流.文献[8]研究了换流变压器阀侧绕组发生瞬时性单相接地时故障持续时间对换流器换相的影响,结果表明现有保护难以反映这种故障,不足之处是未提出解决方案.

目前,针对换流变压器阀侧绕组单相接地后的零序过流保护动作性能分析鲜见报道.

本文依据阀导通状态将 LCC-HVDC 系统中整流侧换流变压器阀侧单相接地后的 1 个工频周期划分为多个时段.基于共同点对时段进行归类并按类分析了电流流路径、列写回路方程并求解网侧和阀侧电流,将多个时段依次合并得到故障后 1 个工频周期的网侧电流及阀侧电流的表达式.采用全波傅里叶算法计算差动电流及零序电流中的基波幅值和谐波幅值,分析了差动保护及零序过流保护的動作性能.针对低压桥换流变压器阀侧绕组单相接地后差动保护及零序过流保护拒动的情况,提出了一种接地保护新方案,能有效提高换流变压器保护性能,并通过仿真验证了保护方案的有效性.

## 1 阀侧绕组单相接地对差动保护和零序过流保护动作性能的影响

### 1.1 对差动保护动作性能的影响

#### 1.1.1 故障后 1 个工频周期的时段划分及归类

图 1 为 LCC-HVDC 系统整流侧接线,交流等值系统通过 YNd11 接线和 YNy0 接线的高、低压桥换流变压器并联,为 12 脉动换流器提供相位差为  $30^\circ$  的交流电压,高、低压桥换流变压器的变比分别为  $k_{V\Delta}$ 、 $k_{VY}$ .  $\dot{E}_a$ 、 $\dot{E}_b$ 、 $\dot{E}_c$  为交流等值系统三相电势,  $E_a = E_b = E_c = E_m$ ;换流变压器漏抗  $L_a = L_b = L_c = L_T$ ;  $CT_{xa(A)}$ 、 $CT_{xb(B)}$ 、 $CT_{xc(C)}$  ( $x=1,2,3,4$ ) 为三相电流互感器,且阀侧电流互感器装在绕组内,规定其电流流入换流变压器为正.

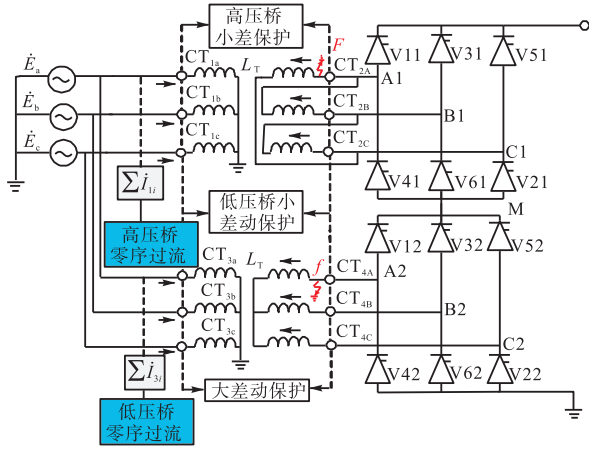


图1 LCC-HVDC系统换流变压器接线

Fig.1 Converter transformer wiring of LCC-HVDC system

图1中显示了差动保护及零序过流保护的配置,其中 $CT_{1i}$  ( $i = a, b, c$ )和 $CT_{2j}$  ( $j = A, B, C$ )构成高压桥换流变压器的小差动保护, $CT_{3i}$ 和 $CT_{4j}$ 构成低压桥换流变压器的小差动保护, $CT_{1i}$ 、 $CT_{2j}$ 、 $CT_{3i}$ 和 $CT_{4j}$ 构成大差动保护;高压桥换流变压器零序过流保护和低压桥换流变压器零序过流保护的电流可分别由网侧三相电流互感器 $CT_{1i}$ 和 $CT_{3i}$ 合成。

阀的导通条件为:在自然换相点即图2的 $C_1 \sim C_6$ 之后延迟 $\alpha$  ( $10^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ )收到触发脉冲且承受正电压。换相点的编号顺序与阀接收触发脉冲的顺序对应(如 $C_1$ 与V11和V12对应, $C_2$ 与V21和V22对应,…)。从上一个导通状态转换到下一个导通状态的换相过程所持续的电角度用换相角 $\mu$  ( $20^\circ \leq \mu \leq 30^\circ$ )表示,一个换相周期内每个阀导通时间为 $120^\circ + \mu$ 。因此,正常运行时在高、低压桥换流变压器阀侧绕组出口电压 $u_{Ai}$ 、 $u_{Bj}$ 、 $u_{Ck}$  ( $i, j, k = 1, 2$ )作用下,一个换相周期内存在如图2给出的12种阀导通状态,包括6种

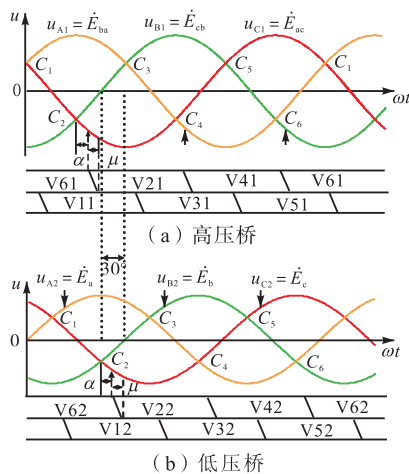


图2 阀侧绕组出口电压及阀的导通区间

Fig.2 Outlet voltage of valve-side windings and valve conduction interval

非换相导通状态和6种换相导通状态。高压桥阀侧电压超前低压桥 $30^\circ$ ,对应阀的导通区间也超前 $30^\circ$ 。

换流变压器阀侧绕组单相接地后,阀状态与正常运行时不同。当A相接地发生在低压桥阀侧绕组 $f$ 点时, $u_{Af} = 0$ 、 $u_{Bf} = \dot{E}_{ba}$ 、 $u_{Cf} = \dot{E}_{ca}$ 。假设故障发生时V11、V21、V12和V22导通,对故障桥换流器而言,阀电流增加导致换相过程中退出运行的阀需要更长时间释放能量,因此换相过程延长、换相角 $\mu$ 增加,这使得非换相状态减少、换相状态增加<sup>[9-10]</sup>。以V22向V42的换相为例,V22换相过程延长导致V22和V42在较长时间内同时导通,所以没有了V32和V42导通的非换相状态,而增加了V22、V32、V42、V52导通,V22、V42、V52导通以及V22、V42、V52、V62导通的换相状态。因此,故障后1个工频周期有4种非换相状态和8种换相状态,如表1所示,这12种阀状态对应12个时段。

表1 故障后1个工频周期的阀状态

Tab.1 Valve states for one power frequency cycle after fault

故障发生在低压桥		换相状态或非换相状态	故障发生在高压桥	
时段	阀状态		时段	阀状态
①	V12, V22	非换相状态	(1)	V11, V21
②	V12, V22, V32	换相状态	(2)	V11, V21, V31
③	V22, V32	非换相状态	(3)	V21, V31
④	V22, V32, V42	换相状态	(4)	V21, V31, V41
⑤	V22, V32, V42, V52	换相状态	(5)	V21, V31, V41, V51
⑥	V22, V42, V52	换相状态	(6)	V21, V41, V51
⑦	V22, V42, V52, V62	换相状态	(7)	V21, V41, V51, V61
⑧	V42, V52, V62	换相状态	(8)	V41, V51, V61
⑨	V52, V62	非换相状态	(9)	V51, V61
⑩	V52, V62, V12	换相状态	(10)	V51, V61, V11
⑪	V62, V12	非换相状态	(11)	V61, V11
⑫	V62, V12, V22	换相状态	(12)	V61, V11, V21

当故障发生在高压桥 $F$ 点时, $u_{Af} = 0$ 、 $u_{Bf} = \dot{E}_{ba}$ 、 $u_{Cf} = \dot{E}_{ca}$ 。同样地,假设故障发生时V11、V21、V12和V22导通,阀电流的增加导致故障桥换流器在换相过程中退出运行的阀需要更长时间释放能量,故换相过程延长、换相角 $\mu$ 增加,从而使非换相状态减少、换相状态增加。如表1所示,故障后的1个工频周期中也有4种非换相状态和8种换相状态。

根据时段内的共同特点对12个时段进行划分。低压桥 $f$ 点故障,时段类型I<sub>L</sub>包括时段①、③、④、⑥,共同特点为 $u_{A2} = u_{C2} = 0$ ;时段类型II<sub>L</sub>包括时段②、⑤、⑦、⑩、⑫,共同特点为 $u_{A2} = u_{B2} = u_{C2} = 0$ ;时段类型III<sub>L</sub>包括时段⑧、⑨、⑪,共同特点为 $u_{A2} =$

$u_{B2} = 0$ . 同样地, 高压桥  $F$  点故障分 6 种时段类型, 时段(1)、(2)、(3)为类型  $I_H$ , 共同特点为共阳极阀  $V21$  导通; 时段(4)、(5)、(6)为类型  $II_H$ , 共同特点为共阳极阀  $V21$ 、 $V41$  导通; 时段(7)为类型  $III_H$ , 共阳极阀  $V21$ 、 $V41$ 、 $V61$  导通; 时段(8)为类型  $IV_H$ , 共阳极阀  $V41$ 、 $V61$  导通; 时段(9)、(10)、(11)为类型  $V_H$ , 共同特点为共阳极阀  $V61$  导通; 时段(12)为类型  $VI_H$ , 共阳极阀  $V21$ 、 $V61$  导通. 具体时段分类列于表 2.

表 2 故障后时段分类情况

Tab.2 Classification of time periods after fault

故障位置	分类情况
低压桥 $f$ 点	时段类型 $I_L$ : ①、③、④、⑥ 时段类型 $II_L$ : ②、⑤、⑦、⑩、⑫ 时段类型 $III_L$ : ⑧、⑨、⑪
高压桥 $F$ 点	时段类型 $I_H$ : (1)、(2)、(3) 时段类型 $II_H$ : (4)、(5)、(6) 时段类型 $III_H$ : (7) 时段类型 $IV_H$ : (8) 时段类型 $V_H$ : (9)、(10)、(11) 时段类型 $VI_H$ : (12)

1.1.2 低压桥阀侧绕组单相接地

低压桥阀侧绕组  $f$  点  $A$  相接地时, 由于  $u_{A1}$ 、 $u_{B1}$ 、 $u_{C1}$  保持不变, 高压桥换流器能够正常导通及换相, 换流变压器差动电流  $i_{diff\Delta a}$ 、 $i_{diff\Delta b}$ 、 $i_{diff\Delta c}$  均为 0, 小差动保护不动作. 以下分析低压桥换流变压器  $A$  相小差动保护和大差动保护的動作性能.

时段类型  $I_L$ : 由于  $u_{A2} = u_{C2} = 0$ , 低压桥换流变压器阀侧绕组等效为  $A$ 、 $C$  两相接地. 以时段① $V12$ 、 $V22$  导通为例, 故障电流流通路径示于图 3. 回路 I 是低压桥换流变压器提供的电流, 经接地极、 $V22$ 、 $C$  相绕组、 $A$  相绕组和故障点形成回路; 回路 II 是高压桥换流变压器提供的电流, 经  $V11$ 、直流线路、故障点和  $V12$  构成回路.  $E_{eq}$  和  $Z_{eq}$  分别为直流系统的等效电势和等效阻抗.

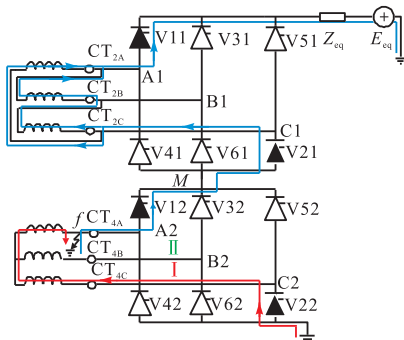


图 3  $V12$ 、 $V22$ 导通情况下  $f$  点  $A$  相接地

Fig.3 A-phase grounding occurs at  $f$ -point when  $V12$  and  $V22$  are on

流过网侧  $a$  相绕组的电流  $i_{3a}$  由  $\dot{E}_{ca}$  提供, 即

$$i_{3a} = \dot{E}_{ca} / [2(Z_S + Z_T)] = \sqrt{3} \dot{E}_a e^{j150^\circ} / [2(Z_S + Z_T)] \quad (1)$$

式中  $Z_S$  和  $Z_T$  分别为交流等值系统和换流变压器的阻抗.

流过阀侧  $CT_{4A}$  的电流: 时段① $V12$  和  $V22$  导通,  $i_{4A}$  为回路 II 电流. 因为高、低压桥换流变压器额定容量相同, 回路 II 阻抗远大于回路 I 阻抗, 所以回路 II 电流远小于回路 I 电流  $i_1$ , 而网侧  $a$  相绕组电流  $i_{3a}$  与阀侧  $A$  相绕组电流  $i_{4Aw}$  之间满足  $i_{3a} = i_{4Aw} / k_{Y/Y} = i_1 / k_{Y/Y}$ , 故  $I_{4A} \ll I_{3a}$ ; 时段③ $V22$ 、 $V32$  导通而  $V12$  关断, 故  $I_{4A} = 0$ ; 时段④和⑥分别为  $V22$ 、 $V32$ 、 $V42$  导通和  $V22$ 、 $V42$ 、 $V52$  导通,  $i_{4A}$  为仅维持  $V42$  导通的数值很小的电流, 故  $I_{4A} \ll I_{3a}$ .

时段类型  $II_L$ :  $u_{A2} = u_{B2} = u_{C2} = 0$ , 低压桥换流变压器阀侧绕组等效为三相短路. 时段⑩ $V52$ 、 $V62$ 、 $V12$  导通情况下的故障电流流通路径示于图 4, 回路 I 是低压桥换流变压器提供的电流, 经接地极、 $V62$ 、 $B$  相绕组后分为 2 路, 一路经  $A$  相绕组至故障点, 另一路经  $C$  相绕组、 $V52$  流至高压桥、直流线路最终到故障点; 回路 II 是高压桥换流变压器提供的电流, 经  $V12$ 、高压桥、直流线路和故障点形成回路.

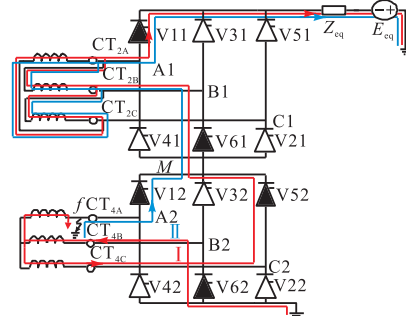


图 4  $V52$ 、 $V62$ 及  $V12$ 导通情况下  $f$  点  $A$  相接地

Fig.4 A-phase grounding occurs at  $f$ -point when  $V52$ ,  $V62$  and  $V12$  are on

网侧  $a$  相绕组电流  $i_{3a}$  由  $\dot{E}_a$  提供, 即

$$i_{3a} = \dot{E}_a / (Z_S + Z_T) \quad (2)$$

流过阀侧  $CT_{4A}$  的电流: 时段② $V12$ 、 $V22$ 、 $V32$  导通,  $i_{4A}$  为  $V12$  向  $V32$  的换相电流, 其小于时段①时的数值, 因此  $I_{4A} \ll I_{3a}$ ; 时段⑤和⑦分别为  $V22$ 、 $V32$ 、 $V42$ 、 $V52$  导通和  $V22$ 、 $V42$ 、 $V52$ 、 $V62$  导通,  $i_{4A}$  是维持  $V42$  导通的小电流, 故  $I_{4A} \ll I_{3a}$ ; 时段⑩ $V52$ 、 $V62$  和  $V12$  导通,  $i_{4A}$  为  $V52$  向  $V12$  换相的电流, 其增加至  $V52$  关断后变为回路 II 电流. 由于回路 II 阻抗远大于回路 I 阻抗, 所以回路 II 电流远小于回路 I 电流  $i_1$ ,  $i_{3a} = i_{4Aw} / k_{Y/Y} = i_1 / k_{Y/Y}$ , 故  $I_{4A} \ll I_{3a}$ ; 时

段⑩, V62、V12 和 V22 导通,  $i_{4A}$  为回路 II 电流,  $I_{4A} \ll I_{3a}$ .

时段类型 III<sub>L</sub>:  $u_{A2} = u_{B2} = 0$ , 等效为 A、B 两相接地. 图 5 时段⑨V52、V62 导通下, 电流经接地极、V62、B 相绕组后分为两路, 一路经 A 相绕组至故障点, 另一路经 C 相绕组、V52 流至高压桥、直流线路最终到达故障点.

$i_{3a}$  由  $\dot{E}_{ba}$  提供, 即

$$\begin{aligned} \dot{I}_{3a} &= \dot{E}_{ba} / [2(Z_S + Z_T)] = \\ &= \sqrt{3} \dot{E}_a e^{-j150^\circ} / [2(Z_S + Z_T)] \end{aligned} \quad (3)$$

流过阀侧 CT<sub>4A</sub> 的电流: 时段⑧V42、V52、V62 导通,  $i_{4A}$  是维持 V42 导通的小电流,  $I_{4A} \ll I_{3a}$ ; 时段⑨V52 和 V62 导通、V42 关断,  $I_{4A} = 0$ ; 时段⑩V62 和 V12 导通,  $i_{4A}$  为回路 II 电流,  $i_{3a} = i_{4Aw} / k_{Y/Y} = i_1 / k_{Y/Y}$ , 回路 II 电流远小于回路 I 电流  $i_1$ , 则  $I_{4A} \ll I_{3a}$ .

$$i_{3a} = \begin{cases} \sqrt{3}/2 [E_m / (Z_S + Z_T)] \sin(\omega t + 150^\circ - \varphi_Z) & 90^\circ + \alpha + \mu < \omega t < 150^\circ + \alpha \\ E_m / (Z_S + Z_T) \sin(\omega t - \varphi_Z) & 150^\circ + \alpha < \omega t < 150^\circ + \alpha + \mu \\ \sqrt{3}/2 [E_m / (Z_S + Z_T)] \sin(\omega t + 150^\circ - \varphi_Z) & 150^\circ + \alpha + \mu < \omega t < 210^\circ + \alpha \\ \sqrt{3}/2 [E_m / (Z_S + Z_T)] \sin(\omega t + 150^\circ - \varphi_Z) & 210^\circ + \alpha < \omega t < 270^\circ + \alpha \\ E_m / (Z_S + Z_T) \sin(\omega t - \varphi_Z) & 270^\circ + \alpha < \omega t < 270^\circ + \alpha + \mu \\ \sqrt{3}/2 [E_m / (Z_S + Z_T)] \sin(\omega t + 150^\circ - \varphi_Z) & 270^\circ + \alpha + \mu < \omega t < 330^\circ + \alpha \\ E_m / (Z_S + Z_T) \sin(\omega t - \varphi_Z) & 330^\circ + \alpha < \omega t < 380^\circ \\ \sqrt{3}/2 [E_m / (Z_S + Z_T)] \sin(\omega t - 150^\circ - \varphi_Z) & 380^\circ < \omega t < 390^\circ \\ \sqrt{3}/2 [E_m / (Z_S + Z_T)] \sin(\omega t - 150^\circ - \varphi_Z) & 390^\circ < \omega t < 390^\circ + \alpha \\ E_m / (Z_S + Z_T) \sin(\omega t - \varphi_Z) & 390^\circ + \alpha < \omega t < 390^\circ + \alpha + \mu \\ \sqrt{3}/2 [E_m / (Z_S + Z_T)] \sin(\omega t - 150^\circ - \varphi_Z) & 390^\circ + \alpha + \mu < \omega t < 450^\circ + \alpha \\ E_m / (Z_S + Z_T) \sin(\omega t - \varphi_Z) & 450^\circ + \alpha < \omega t < 450^\circ + \alpha + \mu \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\varphi_Z = \arg(Z_S + Z_T)$ .

因为小差动  $\dot{I}_{diffYa} = \dot{I}_{3a} + \dot{I}_{4A} / k_{Y/Y}$  且  $I_{4A} \ll I_{3a}$ , 有

$$\dot{I}_{diffYa} \approx \dot{I}_{3a} \quad (5)$$

图 6 给出了  $\mu = 20^\circ$  情况下根据式 (4) 和 (5) 得到的故障后 1 个工频周期的  $\dot{I}_{diffYa}$  波形, 可以看出  $\dot{I}_{diffYa}$  含有较大的谐波分量. 通过全波傅里叶算法计算的基波振幅  $I_{diffYa-1} = 1.282 E_m / (Z_S + Z_T)$ 、2 次谐波振幅  $I_{diffYa-2} = 0.267 E_m / (Z_S + Z_T)$  及 2 次谐波比  $21\% > 15\%$ . 在  $\mu$  的正常范围内, 故障后 1 个工频周期  $\dot{I}_{diffYa}$  的基波、2 次谐波及其占比列于表 3. 因此, 当低压桥换流变压器阀侧绕组单相接地时, 其小差动保护会因 2 次谐波制动误闭锁, 又因为大差动保护  $\dot{I}_{DIFFA} = \dot{I}_{diff\Delta a} + \dot{I}_{diffYa} = \dot{I}_{diffYa}$ , 其也会因 2 次谐波比  $I_{DIFFA-2} / I_{DIFFA-1} > 15\%$  而拒动.

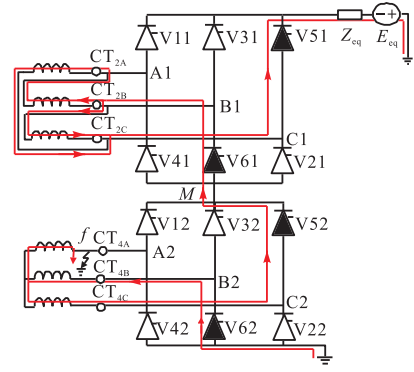


图 5 V52、V62 导通情况下  $f$  点 A 相接地

Fig.5 A-phase grounding occurs at  $f$ -point when V52 and V62 are on

随着阀状态的切换,  $i_{3a}$  按照时段①~⑫的顺序变化. 由以上分析得到图 2 中  $C_2$  之后  $\alpha + \mu$  时刻阀侧 A 相绕组接地后的网侧电流  $i_{3a}$  1 个工频周期表达式为

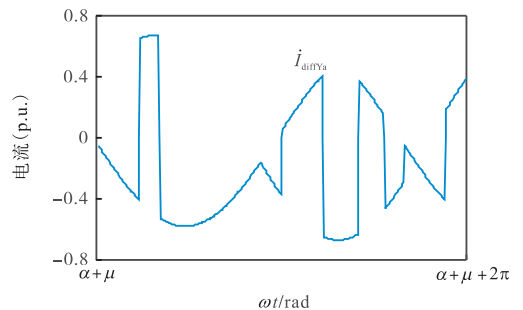


图 6 故障后 1 个工频周期  $\dot{I}_{diffYa}$  波形

Fig.6 Waveform of  $\dot{I}_{diffYa}$  in one power frequency cycle after fault

拒动的原因归结为: 低压桥换流变压器阀侧绕组单相接地后, 换流器工作的非线性使得单相接地随着阀导通及换相交替等效为两相接地和三相短路, 因此

小差动电流和大差动电流中均含有较大的谐波成分, 其中的 2 次谐波比超过 15%, 差动保护因 2 次谐波制动误闭锁. 2013 年 5 月, 天广直流输电工程 (1 800 MW, ± 500 kV, 1.8 kA) 中换流变压器阀侧绕组发生单相接地故障, 差动保护失灵, 对直流、交流系统造成严重影响<sup>[11]</sup>.

表 3  $i_{diffYa}$  基波、2 次谐波及 2 次谐波占比

Tab.3 Fundamental wave, second harmonic and their ratio of  $i_{diffYa}$

$\mu/(\circ)$	$I_{diffYa-1}$	$I_{diffYa-2}$	$(I_{diffYa-2}/I_{diffYa-1})/\%$
22	$1.287E_m/(Z_S + Z_T)$	$0.277E_m/(Z_S + Z_T)$	21.5
24	$1.291E_m/(Z_S + Z_T)$	$0.288E_m/(Z_S + Z_T)$	22.3
26	$1.296E_m/(Z_S + Z_T)$	$0.299E_m/(Z_S + Z_T)$	23.1
28	$1.300E_m/(Z_S + Z_T)$	$0.309E_m/(Z_S + Z_T)$	23.8
30	$1.303E_m/(Z_S + Z_T)$	$0.318E_m/(Z_S + Z_T)$	24.4

1.1.3 高压桥阀侧绕组单相接地

高压桥阀侧绕组  $F$  点 A 相接地,  $u_{A2}$ 、 $u_{B2}$  和  $u_{C2}$  保持不变, 低压桥换流器正常导通及换相, 换流变压器差动电流  $i_{diffYa}$ 、 $i_{diffYb}$  和  $i_{diffYc}$  均为 0, 小差动保护不动作.

时段类型 I<sub>H</sub>: 高压桥共阳极阀 V21 导通. 图 7 时段 (1) V11、V21 导通下, 阀侧绕组中的紫色虚线所示零序电流  $i_0$  由感应电势产生的零序电压  $\dot{U}_0 = -\dot{E}_a/k_{Y/\Delta}$  提供; 低压桥流入高压桥的电流  $i_M$  流过 V21 后分成两路, 一路经 C 相、B 相绕组到达故障点, 另一路经 A 相绕组到故障点.

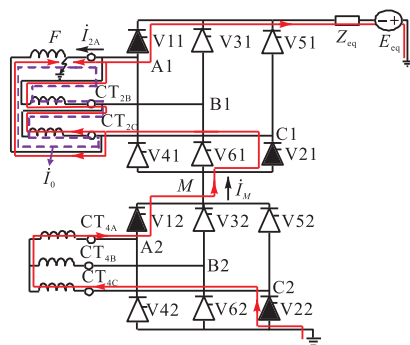


图 7 V11、V21 导通情况下  $F$  点 A 相接地

Fig.7 A-phase grounding occurs at  $F$ -point when V11 and V21 are on

网侧  $CT_{1a}$  电流  $i_{1a}$  和阀侧  $CT_{2A}$  的电流  $i_{2A}$  分别为

$$\begin{cases} i_{1a} = \dot{E}_a / (Z_S + Z_T) \\ i_{2A} = i_0 + 1/3 i_M \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $i_0 = (-\dot{E}_a/k_{Y/\Delta})/Z_T$ . 由于  $CT_{2A}$ 、 $CT_{2B}$  和  $CT_{2C}$  安装在角形连接的阀侧绕组内部, 差动电流  $i_{diff\Delta a}$  的计算不需要 Y- $\Delta$  变换, 因此有

$$i_{diff\Delta a} = i_{1a} + \frac{i_{2A}}{k_{Y/\Delta}} = \frac{\dot{E}_a}{Z_S + Z_T} - \frac{\dot{E}_a/Z_T}{k_{Y/\Delta}^2} + \frac{i_M/3}{k_{Y/\Delta}} \quad (7)$$

时段类型 II<sub>H</sub>: 高压桥共阳极阀 V21 和 V41 导通. 图 8 时段 (6) V21、V41、V51 导通下, 阀侧绕组电流包括绕组中环流的零序电流  $i_0$  和从低压桥流入高压桥的电流  $i_M$ .  $i_M$  到  $M$  点后分成两路, 一路经 V41 流入故障点, 另一路经 V21 之后分成两个支路, 一支分别通过 C、B 两相绕组和 A 相绕组到故障点, 另一支经 V51、直流线路到故障点. 流经  $CT_{1a}$  和  $CT_{2A}$  的电流为

$$\begin{cases} i_{1a} = \dot{E}_a / (Z_S + Z_T) \\ i_{2A} = i_0 + 1/3 i_{V21T} + i_{V41} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $i_{V21}$  为经 V21 流入高压桥换流变压器和直流线路的电流;  $i_{V21T}$  为流入高压桥换流变压器的电流,  $i_{V21T} \approx i_{V21}$ ;  $i_{V41}$  为流过 V41 的电流. 小差动电流为

$$\begin{aligned} i_{diff\Delta a} &= i_{1a} + \frac{i_{2A}}{k_{Y/\Delta}} = \frac{\dot{E}_a}{Z_S + Z_T} - \frac{\dot{E}_a/Z_T}{k_{Y/\Delta}^2} + \frac{i_{V21T}/3}{k_{Y/\Delta}} + \frac{i_{V41}}{k_{Y/\Delta}} \approx \\ &= \frac{\dot{E}_a}{Z_S + Z_T} - \frac{\dot{E}_a/Z_T}{k_{Y/\Delta}^2} + \frac{i_{V21}/3}{k_{Y/\Delta}} + \frac{i_{V41}}{k_{Y/\Delta}} \approx \\ &= \frac{\dot{E}_a}{Z_S + Z_T} - \frac{\dot{E}_a/Z_T}{k_{Y/\Delta}^2} + \frac{i_M}{k_{Y/\Delta}} \end{aligned} \quad (9)$$

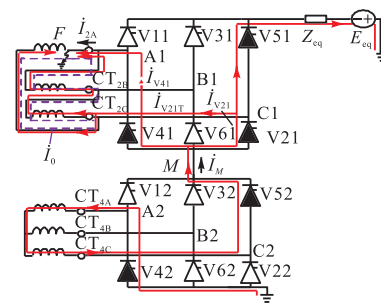


图 8 V21、V41、V51 导通情况下  $F$  点 A 相接地

Fig.8 A-phase grounding occurs at  $F$ -point when V21, V41 and V51 are on

时段类型 III<sub>H</sub>: 仅包括 V21、V41、V61、V51 导通的时段 (7), 图 9(a) 中,  $i_0$  在阀侧绕组中环流;  $i_M$  到达  $M$  点后分为 3 路, 对应的等效电路如图 9(b) ~ (d).

$$\begin{cases} i_{1a} = \dot{E}_a / (Z_S + Z_T) \\ i_{2A} = i_0 + 1/3 i_{V21T} + i_{V41} + 2/3 i_{V61} \end{cases} \quad (10)$$

$$i_{diff\Delta a} = i_{1a} + \frac{i_{2A}}{k_{Y/\Delta}} = \frac{\dot{E}_a}{Z_S + Z_T} -$$

$$\frac{\dot{E}_a/Z_T + \dot{i}_{V21T}/3 + \dot{i}_{V41} + 2\dot{i}_{V61}/3}{k_{Y/\Delta}^2 + k_{Y/\Delta} + k_{Y/\Delta}} \approx \frac{\dot{E}_a}{Z_S + Z_T} - \frac{\dot{E}_a/Z_T}{k_{Y/\Delta}^2} + \frac{\dot{i}_M}{k_{Y/\Delta}} \quad (11)$$

式中  $\dot{i}_{V61}$  为流过 V61 的电流。

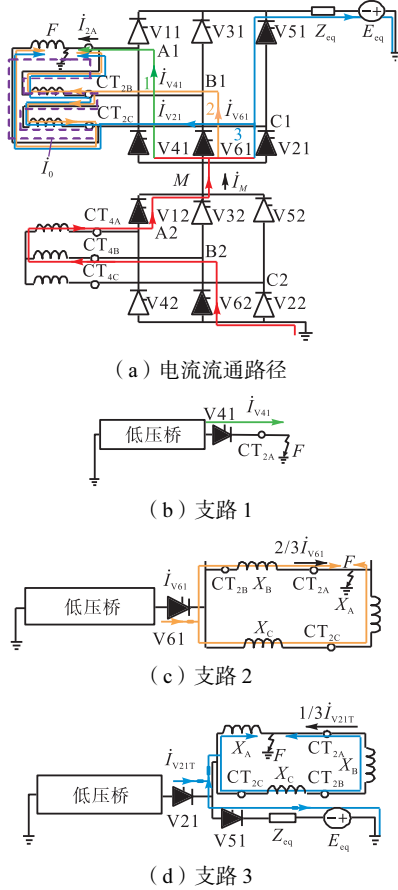


图9 V21、V41、V61、V51导通情况下F点A相接地  
Fig.9 A-phase grounding occurs at F-point when V21, V41, V61 and V51 are on

时段类型IV<sub>H</sub>: 仅包括 V41、V61、V51 导通的时段(8), 图 10 中,  $\dot{i}_0$  在阀侧绕组中环流;  $\dot{i}_M$  到 M 点后分成两路, 一路经 V41 至故障点, 另一路经 V61 后分别过 C、A 两相绕组和 B 相绕组至故障点。

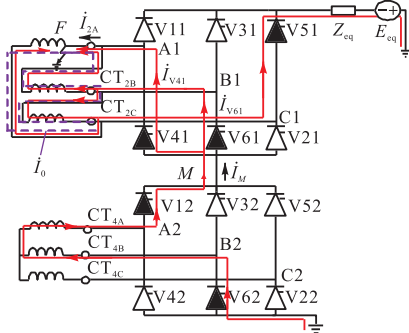


图10 V41、V61、V51导通情况下F点A相接地  
Fig.10 A-phase grounding occurs at F-point when V41, V61 and V51 are on

流经 CT<sub>1a</sub> 和 CT<sub>2A</sub> 的电流为

$$\begin{cases} \dot{i}_{1a} = \dot{E}_a / (Z_S + Z_T) \\ \dot{i}_{2A} = \dot{i}_0 + \dot{i}_{V41} + 2/3 \dot{i}_{V61} \end{cases} \quad (12)$$

小差动电流为

$$\begin{aligned} \dot{i}_{diff\Delta a} &= \dot{i}_{1a} + \frac{\dot{i}_{2A}}{k_{Y/\Delta}} = \frac{\dot{E}_a}{Z_S + Z_T} - \frac{\dot{E}_a/Z_T}{k_{Y/\Delta}^2} + \frac{2\dot{i}_{V61}/3}{k_{Y/\Delta}} \\ &\approx \frac{\dot{E}_a}{Z_S + Z_T} - \frac{\dot{E}_a/Z_T}{k_{Y/\Delta}^2} + \frac{\dot{i}_M}{k_{Y/\Delta}} \end{aligned} \quad (13)$$

时段类型V<sub>H</sub>: 高压桥共阳极阀 V61 导通. 图 11 时段(11)V61、V11 导通下,  $\dot{i}_0$  在阀侧绕组中环流;  $\dot{i}_M$  流过 V61 后分别经 C、A 两相绕组和 B 相绕组到达故障点。

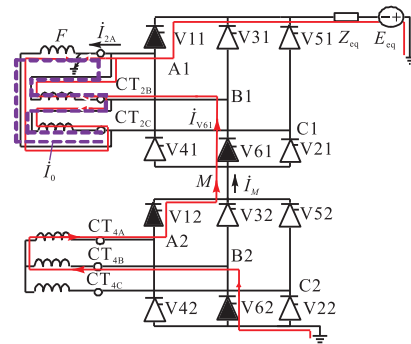


图11 V61、V11导通情况下F点A相接地  
Fig.11 A-phase grounding occurs at F-point when V61 and V11 are on

$$\begin{cases} \dot{i}_{1a} = \dot{E}_a / (Z_S + Z_T) \\ \dot{i}_{2A} = \dot{i}_0 + 2/3 \dot{i}_M \end{cases} \quad (14)$$

$$\dot{i}_{diff\Delta a} = \dot{i}_{1a} + \frac{\dot{i}_{2A}}{k_{Y/\Delta}} = \frac{\dot{E}_a}{Z_S + Z_T} - \frac{\dot{E}_a/Z_T}{k_{Y/\Delta}^2} + \frac{2\dot{i}_M/3}{k_{Y/\Delta}} \quad (15)$$

时段类型VI<sub>H</sub>: 仅包括 V21、V61、V11 导通的时段(12), 图 12 中,  $\dot{i}_0$  在阀侧绕组环流;  $\dot{i}_M$  到 M 点后分成两路, 一路过 V21 后分别经 C、B 两相绕组和 A 相绕组到故障点, 另一路过 V61 后分别经 C、A 两相绕组和 B 相绕组到故障点。

$$\begin{cases} \dot{i}_{1a} = \dot{E}_a / (Z_S + Z_T) \\ \dot{i}_{2A} = \dot{i}_0 + 2/3 \dot{i}_{V61} + 1/3 \dot{i}_{V21} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_{diff\Delta a} &= \dot{i}_{1a} + \frac{\dot{i}_{2A}}{k_{Y/\Delta}} = \frac{\dot{E}_a}{Z_S + Z_T} - \frac{\dot{E}_a/Z_T}{k_{Y/\Delta}^2} + \frac{2\dot{i}_{V61}/3}{k_{Y/\Delta}} + \frac{\dot{i}_{V21}/3}{k_{Y/\Delta}} \\ &\approx \frac{\dot{E}_a}{Z_S + Z_T} - \frac{\dot{E}_a/Z_T}{k_{Y/\Delta}^2} + \frac{\dot{i}_M}{k_{Y/\Delta}} \end{aligned} \quad (17)$$

由式(7)、(9)、(11)、(13)、(15)和(17)可知,高压桥阀侧绕组单相接地后,高压桥换流变压器的小差动电流  $i_{diff\Delta a}$  包括 3 部分:网侧电流  $i_{1a}$ 、零序电流  $i_0$  和低压桥流入高压桥的电流  $i_M$ 。其中,交流等值系统提供的基频分量  $i_{1a}$  和  $i_0$  具有较大的值,在  $i_{diff\Delta a}$  中占据主导地位。因此,其小差动保护能动作,又因为  $i_{DIFFA} = i_{diff\Delta a} + i_{diffY_a} = i_{diff\Delta a}$ ,大差动保护也能反映这种故障。

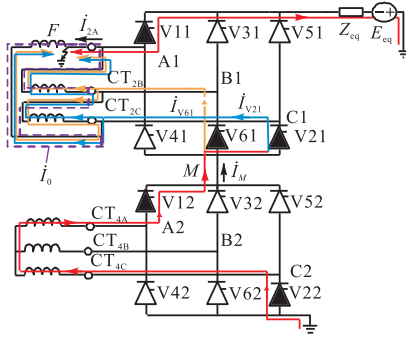


图 12 V61、V21、V11导通情况下 F点 A 相接地  
Fig.12 A-phase grounding occurs at F-point when V61, V21 and V11 are on

1.2 对零序过流保护动作性能的影响

低压桥阀侧绕组 f 点 A 相接地后的网侧 a 相电流由式(4)给出,下面分析网侧 b 相和 c 相的电流以及零序电流。

时段类型 I<sub>L</sub>: 等效为 A、C 两相接地,流过网侧 c 相绕组的电流  $i_{3c}$  由  $\dot{E}_{ca}$  提供,写出其表达式为

$$i_{3c} = -\dot{E}_{ca} / [2(Z_S + Z_T)] = -\sqrt{3}\dot{E}_a e^{j150^\circ} / [2(Z_S + Z_T)] \quad (18)$$

流过网侧 b 相绕组的电流  $i_{3b}$ : 在时段①、⑥中与网侧 b 相绕组相联的阀 V32、V62 均不导通,因此  $i_{3b} = 0$ 。时段③、④中,  $i_{4B}$  均为低压桥接地极、阀侧 C、B 相绕组、高压桥和直流线路所构成回路的电流,图 13 给出的是时段④的电流路径,因此有

$$i_{4B} = \frac{\dot{E}_{ab} e^{j30^\circ} / k_{Y/\Delta}}{Z_S + Z_T + Z_{eq}} = \frac{\sqrt{3}\dot{E}_a e^{j60^\circ} / k_{Y/\Delta}}{Z_S + Z_T + Z_{eq}} \quad (19)$$

网侧电流  $i_{3b}$  为

$$i_{3b} = i_{4B} / k_{Y/Y} = \frac{\sqrt{3}\dot{E}_a e^{j60^\circ} / (k_{Y/\Delta} k_{Y/Y})}{Z_S + Z_T + Z_{eq}} \quad (20)$$

时段类型 II<sub>L</sub>: 该类型中换流变压器阀侧绕组等效为三相短路,零序电流  $3i_{0(Y)} = i_{3a} + i_{3b} + i_{3c} = 0$ 。

时段类型 III<sub>L</sub>: 等效为 A、B 两相接地,流过网侧 b 相绕组的电流由  $\dot{E}_{ba}$  提供,其表达式为

$$i_{3b} = -\dot{E}_{ba} / [2(Z_S + Z_T)] = -\sqrt{3}\dot{E}_a e^{-j150^\circ} / [2(Z_S + Z_T)] \quad (21)$$

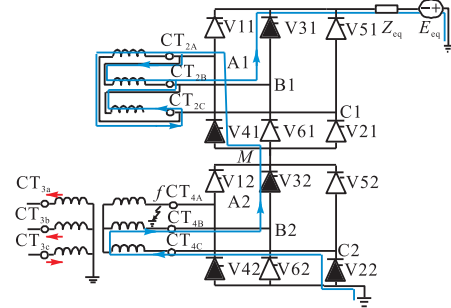


图 13 时段类型 I<sub>L</sub> 零序电流(时段④)  
Fig.13 Zero-sequence current during time period I<sub>L</sub> (time period ④)

流过网侧 c 相绕组的电流  $i_{3c}$ : 时段①中与 C 相绕组相联的阀 V52、V22 均不导通,  $i_{3c} = 0$ ; 时段⑧、⑨中  $i_{4C}$  均为低压桥接地极、阀侧 B、C 相绕组、高压桥、直流线路所构成回路的电流,由图 14 给出的时段⑧电流通路径得

$$i_{4C} = \frac{\dot{E}_{ba} e^{j30^\circ} / k_{Y/\Delta}}{Z_S + Z_T + Z_{eq}} = \frac{\sqrt{3}\dot{E}_a e^{-j120^\circ} / k_{Y/\Delta}}{Z_S + Z_T + Z_{eq}} \quad (22)$$

网侧电流  $i_{3c}$  为

$$i_{3c} = i_{4C} / k_{Y/Y} = \frac{\sqrt{3}\dot{E}_a e^{-j120^\circ} / (k_{Y/\Delta} k_{Y/Y})}{Z_S + Z_T + Z_{eq}} \quad (23)$$

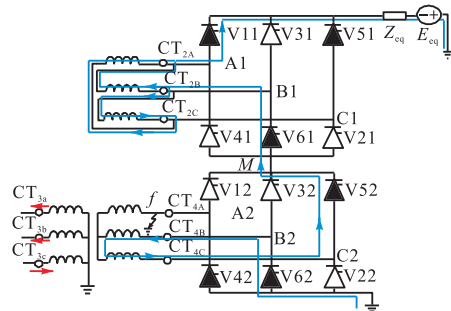


图 14 时段类型 III<sub>L</sub> 零序电流(时段⑧)  
Fig.14 Zero-sequence current during time period type III<sub>L</sub> (time period ⑧)

随着阀状态的切换,  $3i_{0(Y)}$  按照时段①~⑫的顺序变化。同样以图 2 中 C<sub>2</sub> 之后  $\alpha + \mu$  时刻发生阀侧绕组 a 相接地为例,故障后 1 个工频周期期的  $3i_{0(Y)}$  表达式为

$$3\dot{I}_{0(Y)} = \dot{I}_{3a} + \dot{I}_{3b} + \dot{I}_{3c} = \begin{cases} 0 & 90^\circ + \alpha + \mu < \omega t < 150^\circ + \alpha \\ 0 & 150^\circ + \alpha < \omega t < 150^\circ + \alpha + \mu \\ \sqrt{3} E_m / [(k_{Y/\Delta} k_{Y/Y})(Z_S + Z_T + Z_{eq})] \sin(\omega t + 60^\circ - \phi'_Z) & 150^\circ + \alpha + \mu < \omega t < 210^\circ + \alpha \\ \sqrt{3} E_m / [(k_{Y/\Delta} k_{Y/Y})(Z_S + Z_T + Z_{eq})] \sin(\omega t + 60^\circ - \phi'_Z) & 210^\circ + \alpha < \omega t < 270^\circ + \alpha \\ 0 & 270^\circ + \alpha < \omega t < 270^\circ + \alpha + \mu \\ 0 & 270^\circ + \alpha + \mu < \omega t < 330^\circ + \alpha \\ 0 & 330^\circ + \alpha < \omega t < 380^\circ \\ \sqrt{3} E_m / [(k_{Y/\Delta} k_{Y/Y})(Z_S + Z_T + Z_{eq})] \sin(\omega t - 120^\circ - \phi'_Z) & 380^\circ < \omega t < 390^\circ \\ \sqrt{3} E_m / [(k_{Y/\Delta} k_{Y/Y})(Z_S + Z_T + Z_{eq})] \sin(\omega t - 120^\circ - \phi'_Z) & 390^\circ < \omega t < 390^\circ + \alpha \\ 0 & 390^\circ + \alpha < \omega t < 390^\circ + \alpha + \mu \\ 0 & 390^\circ + \alpha + \mu < \omega t < 450^\circ + \alpha \\ 0 & 450^\circ + \alpha < \omega t < 450^\circ + \alpha + \mu \end{cases} \quad (24)$$

式中  $\phi'_Z = \arg(Z_S + Z_T + Z_{eq})$ 。根据式 (24) 给出故障后 1 个工频周期  $3\dot{I}_{0(Y)}$  的波形见图 15, 可以看出: 与普通变压器单相接地时不同, 由于换流变压器阀侧绕组单相接地后多个时段内阀侧等效为三相短路, 故障后 1 个工频周期内约 2/3 的时间零序电流  $3\dot{I}_{0(Y)}$  等于 0, 造成正弦波形严重畸变。

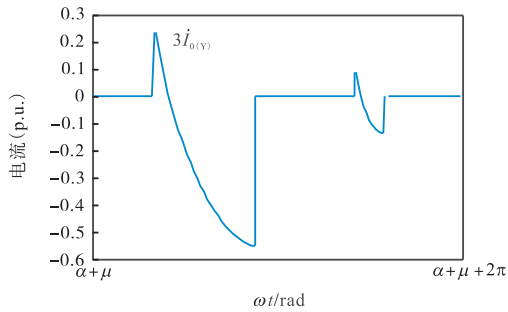


图 15 故障后 1 个工频周期  $3\dot{I}_{0(Y)}$  波形

Fig.15 Waveform of  $3\dot{I}_{0(Y)}$  in one power frequency cycle after fault

表 4 为  $\mu = 20^\circ$  时根据式 (24) 由全波傅里叶算法计算的零序电流  $3\dot{I}_{0(Y)}$  基波幅值、各次谐波幅值以及谐波与基波的比值即占比, 2~6 次谐波占比都远超过了 15.0%。表 5 则给出了不同换相角  $\mu$  时根据式

表 4  $3\dot{I}_{0(Y)}$  基波、2~6 次谐波及其占比

Tab.4 Fundamental wave, 2nd, 3rd, ..., 6th harmonics, and their ratios of  $3\dot{I}_{0(Y)}$

$\mu = 20^\circ$ 时的基波和谐波	幅值	占比/%
基波 $3I_{0(Y)-1}$	$0.1195 E_m / [(k_{Y/\Delta} k_{Y/Y})(Z_S + Z_T + Z_{eq})]$	100
2 次谐波 $3I_{0(Y)-2}$	$0.1236 E_m / [(k_{Y/\Delta} k_{Y/Y})(Z_S + Z_T + Z_{eq})]$	103
3 次谐波 $3I_{0(Y)-3}$	$0.1013 E_m / [(k_{Y/\Delta} k_{Y/Y})(Z_S + Z_T + Z_{eq})]$	85
4 次谐波 $3I_{0(Y)-4}$	$0.0574 E_m / [(k_{Y/\Delta} k_{Y/Y})(Z_S + Z_T + Z_{eq})]$	48
5 次谐波 $3I_{0(Y)-5}$	$0.0267 E_m / [(k_{Y/\Delta} k_{Y/Y})(Z_S + Z_T + Z_{eq})]$	22
6 次谐波 $3I_{0(Y)-6}$	$0.0343 E_m / [(k_{Y/\Delta} k_{Y/Y})(Z_S + Z_T + Z_{eq})]$	28

(24) 计算的  $3\dot{I}_{0(Y)}$  基波和谐波占比, 同样地, 2~6 次谐波占比也都超出了 15.0%。

表 5 不同换相角  $\mu$  时  $3\dot{I}_{0(Y)}$  基波及 2~6 次谐波占比

Tab.5 Fundamental wave, and the ratios of 2nd, 3rd, ..., 6th harmonics of  $3\dot{I}_{0(Y)}$  when commutation angle  $\mu$  is different

换相角 $\mu/^\circ$	基波幅值	谐波占比/%				
		2 次	3 次	4 次	5 次	6 次
22	0.120 0	101	83	30	25	26
24	0.120 5	99	81	48	26	25
26	0.121 2	97	79	48	28	23
28	0.121 8	96	77	48	29	22
30	0.122 5	94	75	47	30	21

注: 基波幅值一列的数字需乘  $E_m / [(k_{Y/\Delta} k_{Y/Y})(Z_S + Z_T + Z_{eq})]$ 。

换流变压器的零序过流保护按躲过外部短路的最大不平衡电流整定为

$$3I_{0set} = K_{rel} I_{unb,max} \quad (25)$$

式中: 可靠系数  $K_{rel}$  范围为 1.1~1.2; 最大不平衡电流  $I_{unb,max} = 15\% I_{k,max}$ , 换流变压器阀侧绕组出口三相短路电流  $I_{k,max}$  为

$$I_{k,max} = E_m / (Z_S + Z_T) \quad (26)$$

将式 (26) 代入式 (25) 有

$$3I_{0set} = K_{rel} I_{unb,max} = 0.165 E_m / (Z_S + Z_T) \quad (27)$$

由表 4 知  $\mu = 20^\circ$  时低压桥阀侧绕组单相接地的零序电流为

$$3I_{0(Y)-1} = 0.1195 \times \frac{E_m}{[(k_{Y/\Delta} k_{Y/Y})(Z_S + Z_T + Z_{eq})]} \quad (28)$$

将  $k_{Y/\Delta} = k_{Y/Y} = U_{1N} / U_{2N}$ 、 $U_{1N} = \sqrt{3} E_m$  ( $U_{1N}$ 、 $U_{2N}$  分别为换流变压器网侧、阀侧的额定电压,  $E_m$  是交流等值系统相电势) 代入式 (28) 得

$$3I_{0(Y)-1} = 0.04 U_{2N}^2 / [E_m (Z_S + Z_T + Z_{eq})] \quad (29)$$

因此

$$\frac{3I_{0(Y)-1}}{3I_{0set}} = \frac{0.04 U_{2N}^2}{0.165 E_m^2} \frac{Z_S + Z_T}{Z_S + Z_T + Z_{eq}} < 0.24 \left( \frac{U_{2N}}{E_m} \right)^2 \quad (30)$$

$$\text{式中 } 0.24 \left( \frac{U_{2N}}{E_m} \right)^2 = 0.72 \left( \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}E_m} \right)^2 = 0.72 \left( \frac{1}{k_{VY}} \right)^2.$$

若换流变压器为降压变压器, 则  $k_{VY} > 1$ ,  $3I_{0(Y)-1} < 3I_{0set}$ , 零序过流保护拒动. 若换流变压器为升压变压器, 则  $0.845 < k_{VY} < 1$  时  $3I_{0(Y)-1} < 3I_{0set}$ , 零序过流保护拒动;  $k_{VY} < 0.845$  时  $3I_{0(Y)-1} > 3I_{0set}$ , 零序过流保护正确动作. 表 5 中  $\mu$  范围  $22^\circ \sim 30^\circ$  对应的情况也如此.

低压桥换流变压器阀侧绕组发生单相接地故障, 降压换流变压器零序过流保护会拒动, 而升压换流变压器也可能拒动. 拒动的原因归结为: 换流器工作的非线性使得单相接地随阀导通及换相交替等效为两相接地和三相短路, 故障后 1 个工频周期内约 2/3 的时间零序电流  $3i_{0(Y)}$  等于 0, 基波严重畸变, 零序过流保护计算出的基波幅值小于整定值.

高压桥阀侧绕组单相接地的零序电流  $3i_{0(\Delta)} = i_{1a} + i_{1b} + i_{1c}$ , 其主要成分为等值系统提供的基波电流且幅值越限, 零序过流保护动作.

## 2 换流变压器接地保护新原理

### 2.1 保护判据及动作逻辑

上述分析表明: 低压桥换流变压器阀侧绕组单相接地时, 差动保护因 2 次谐波占比高于 15% 而误闭锁; 作为接地后备的零序过流保护用于降压变压器会拒动, 而用于升压换流变压器也可能拒动. 因此, 有必要研究换流变压器接地保护的新方案.

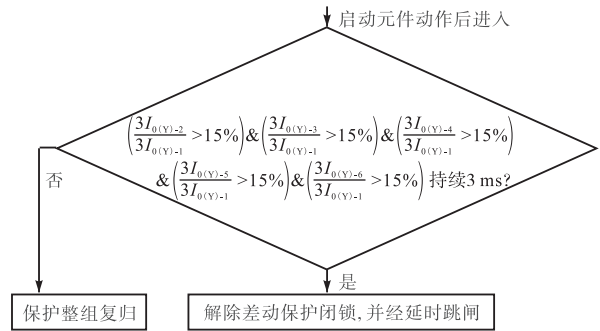
考虑到低压桥换流变压器阀侧绕组单相接地后的  $3i_{0(Y)}$  谐波含量丰富, 且 2~6 次谐波占比均高于 15%, 因此本文提出的接地保护判据如下.

$$\left( \frac{3I_{0(Y)-2}}{3I_{0(Y)-1}} > 15\% \right) \& \left( \frac{3I_{0(Y)-3}}{3I_{0(Y)-1}} > 15\% \right) \& \left( \frac{3I_{0(Y)-4}}{3I_{0(Y)-1}} > 15\% \right) \& \left( \frac{3I_{0(Y)-5}}{3I_{0(Y)-1}} > 15\% \right) \& \left( \frac{3I_{0(Y)-6}}{3I_{0(Y)-1}} > 15\% \right) \text{持续} 3 \text{ ms} \quad (31)$$

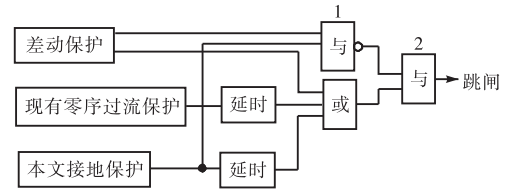
当  $3i_{0(Y)}$  中 2~6 次谐波含量同时高于 15% 时, 接地保护动作.

本文接地保护流程如图 16(a) 所示, 其与差动保护、零序过流保护配合逻辑如图 16(b) 所示. 当除低压桥阀侧绕组单相接地的其他内部故障时, 差动保护动作, 本文接地保护不动作, 现有零序过流保护可能动作也可能不动作, 因此, “或” 输出 1, “与非 1” 输出 1, “与 2” 输出 1, 保护跳闸; 当低压桥换流变

压器阀侧绕组单相接地时, 差动保护不动作, 本文接地保护动作, 现有零序过流保护不动作, “或” 输出 1, “与非 1” 输出 1, “与 2” 输出 1, 保护跳闸; 本文接地保护在励磁涌流情况下会误动, 差动保护可能误动作, 本文接地保护误动作, 现有零序过流保护可能动作也可能不动作, “或” 输出 1, “与非 1” 输出 0, 因此 “与 2” 输出 0, 保护闭锁; 电流互感器 (current transformer, CT) 饱和情况下, 在采取减小不平衡电流措施后差动保护不误动, 本文接地保护不动作, “或” 门输出 0, “与非 1” 输出 1, “与 2” 输出 0, 保护不动作.



(a) 本文接地保护流程



(b) 与差动保护、零序过流保护配合逻辑

图 16 换流变压器接地保护流程

Fig.16 Flow chart of converter transformer grounding protection

可见, 本文接地保护与差动保护及零序过流保护方案互为补充, 有效提高了换流变压器的保护性能.

### 2.2 励磁涌流情况下本文接地保护的動作性能分析

变压器空载合闸和外部故障切除后电压恢复过程中会产生励磁涌流; 励磁涌流的大小和衰减时间与外加电压的相位、铁芯中剩磁的大小和方向、电源容量、回路阻抗以及变压器的容量和铁芯性质均有关; 对于三相变压器而言, 任何时刻合闸至少有两相会出现程度不同的励磁涌流. 励磁涌流时铁芯饱和, 在进入饱和和退出饱和之间变化, 变压器励磁电感  $L_m$  是时域变化的. 为避开对铁芯非线性的描述, 本文选取励磁涌流最严重的情况进行分析.

图 17 单相变压器空载合闸等效电路中, 等值系统电压  $u_A = U_m \sin(\omega t + \alpha_A)$ ,  $R_s$  和  $L_s$ 、 $R_{\delta 1}$  和  $L_{\delta 1}$ 、 $R_{m2}$  和  $L_{m2}$  分别为等值系统、变压器一次绕组、变压器励磁支路的电阻和电感,  $i_A$ 、 $i_{mA}$  和  $i$  为一次绕组电流、励

磁电流和二次绕组电流. 根据基尔霍夫电压定律有

$$(R_s + R_{\delta 1} + R_{m2})i_A(t) + (L_s + L_{\delta 1} + L_{m2}) \cdot \frac{di_A(t)}{dt} = U_m \sin(\omega t + \alpha_A) \quad (32)$$

求解方程得

$$i_A(t) = \frac{U_m}{\sqrt{\omega^2(L_{\delta 1} + L_{m2} + L_s)^2 + (R_{\delta 1} + R_{m2} + R_s)^2}} \cdot \sin(\omega t + \alpha_A - \varphi) + \left[ \frac{U_m \sin(\alpha_A - \varphi)}{\sqrt{\omega^2(L_{\delta 1} + L_{m2} + L_s)^2 + (R_{\delta 1} + R_{m2} + R_s)^2}} + \frac{\Phi_{rA}}{L_{m2} + L_{\delta 1}} \right] e^{-(t/\tau)} \quad (33)$$

式中:  $\varphi = \arctan[\omega(L_s + L_{\delta 1} + L_{m2})/(R_s + R_{\delta 1} + R_{m2})]$  为合闸回路阻抗角;  $\tau = (L_s + L_{\delta 1} + L_{m2})/(R_s + R_{\delta 1} + R_{m2})$  为衰减非周期分量的时间常数,  $\Phi_{rA}$  为变压器 A 相的剩磁.

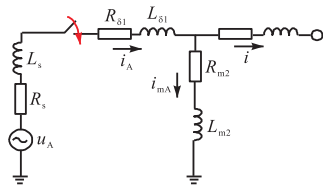


图 17 单相变压器空载合闸等效电路

Fig.17 Equivalent circuit for no-load closing of single-phase transformer

由式(33)知,励磁电流除等值系统提供的基波分量外还包含两个衰减非周期分量,其中一个为平衡合闸瞬间基波分量而产生,另一个由剩磁产生.

对于三绕组变压器而言,以 a 相出现最大励磁涌流为例,此情况对应的三相合闸角分别为  $\alpha_A = 0^\circ$ ,  $\alpha_B = -120^\circ$ ,  $\alpha_C = -240^\circ$ , 由式(33)直接写出三相励磁电流为

$$\left\{ \begin{aligned} i_A(t) &= \frac{-U_m \cos(\omega t + 0^\circ)}{\sqrt{\omega^2(L_{\delta 1} + L_{m2} + L_s)^2 + (R_{\delta 1} + R_{m2} + R_s)^2}} + \left[ \frac{U_m \cos 0^\circ}{\sqrt{\omega^2(L_{\delta 1} + L_{m2} + L_s)^2 + (R_{\delta 1} + R_{m2} + R_s)^2}} + \frac{\Phi_{rA}}{L_{m2} + L_{\delta 1}} \right] e^{-t/\tau} \\ i_B(t) &= \frac{-U_m \cos(\omega t - 120^\circ)}{\sqrt{\omega^2(L_{\delta 1} + L_{m2} + L_s)^2 + (R_{\delta 1} + R_{m2} + R_s)^2}} + \left[ \frac{U_m \cos(-120^\circ)}{\sqrt{\omega^2(L_{\delta 1} + L_{m2} + L_s)^2 + (R_{\delta 1} + R_{m2} + R_s)^2}} + \frac{\Phi_{rB}}{L_{m2} + L_{\delta 1}} \right] e^{-t/\tau} \\ i_C(t) &= \frac{-U_m \cos(\omega t - 240^\circ)}{\sqrt{\omega^2(L_{\delta 1} + L_{m2} + L_s)^2 + (R_{\delta 1} + R_{m2} + R_s)^2}} + \left[ \frac{U_m \cos(-240^\circ)}{\sqrt{\omega^2(L_{\delta 1} + L_{m2} + L_s)^2 + (R_{\delta 1} + R_{m2} + R_s)^2}} + \frac{\Phi_{rC}}{L_{m2} + L_{\delta 1}} \right] e^{-t/\tau} \end{aligned} \right. \quad (34)$$

式中  $\Phi_{rB}$  和  $\Phi_{rC}$  为变压器 B 相和 C 相的剩磁.

对应的零序电流为

$$3i_0 = i_A(t) + i_B(t) + i_C(t) = \frac{U_m \cos(\omega t + 0^\circ)}{\sqrt{\omega^2(L_{\delta 1} + L_{m2} + L_s)^2 + (R_{\delta 1} + R_{m2} + R_s)^2}} + \frac{U_m \cos(\omega t - 120^\circ)}{\sqrt{\omega^2(L_{\delta 1} + L_{m2} + L_s)^2 + (R_{\delta 1} + R_{m2} + R_s)^2}} + \frac{U_m \cos(\omega t - 240^\circ)}{\sqrt{\omega^2(L_{\delta 1} + L_{m2} + L_s)^2 + (R_{\delta 1} + R_{m2} + R_s)^2}} + \left[ \frac{U_m \cos 0^\circ}{\sqrt{\omega^2(L_{\delta 1} + L_{m2} + L_s)^2 + (R_{\delta 1} + R_{m2} + R_s)^2}} + \frac{U_m \cos(-120^\circ)}{\sqrt{\omega^2(L_{\delta 1} + L_{m2} + L_s)^2 + (R_{\delta 1} + R_{m2} + R_s)^2}} + \frac{U_m \cos(-240^\circ)}{\sqrt{\omega^2(L_{\delta 1} + L_{m2} + L_s)^2 + (R_{\delta 1} + R_{m2} + R_s)^2}} \right] e^{-t/\tau} + \frac{(\Phi_{rA} + \Phi_{rB} + \Phi_{rC})e^{-t/\tau}}{L_{m2} + L_{\delta 1}} = \frac{(\Phi_{rA} + \Phi_{rB} + \Phi_{rC})e^{-t/\tau}}{L_{m2} + L_{\delta 1}} \quad (35)$$

由式(35)可知,励磁涌流情况下的零序电流  $3i_0$  只含衰减非周期分量,其初值由三相剩磁之和与变压器电感所决定. 利用指数函数的傅里叶分解公式

$$e^{at} = \frac{e^{a\pi} - e^{-a\pi}}{2a\pi} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (e^{a\pi} - e^{-a\pi})}{(a^2 + k^2)\pi} [a \cos(kt) - k \sin(kt)] = \frac{e^{a\pi} - e^{-a\pi}}{2a\pi} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (e^{a\pi} - e^{-a\pi})}{\pi \sqrt{a^2 + k^2}} \sin\{kt + \arctan[a/(-k)]\} \quad (36)$$

对式(35)进行分解可得

$$3i_0 = i_A + i_B + i_C = \frac{(\Phi_{rA} + \Phi_{rB} + \Phi_{rC})e^{-t/\tau}}{(L_{m2} + L_{\delta 1})} = \left[ \frac{(\Phi_{rA} + \Phi_{rB} + \Phi_{rC})}{(L_{m2} + L_{\delta 1})} \right] \cdot \left[ \frac{e^{-\pi/\tau} - e^{\pi/\tau}}{2(-\pi/\tau)} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (e^{-\pi/\tau} - e^{\pi/\tau})}{\pi \sqrt{(-1/\tau)^2 + k^2}} \sin(kt + \theta) \right] = \left[ \frac{(\Phi_{rA} + \Phi_{rB} + \Phi_{rC})}{(L_{m2} + L_{\delta 1})} \right] \frac{e^{-\pi/\tau} - e^{\pi/\tau}}{2(-\pi/\tau)} + \left[ \frac{(\Phi_{rA} + \Phi_{rB} + \Phi_{rC})}{(L_{m2} + L_{\delta 1})} \right] \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (e^{-\pi/\tau} - e^{\pi/\tau})}{\pi \sqrt{(-1/\tau)^2 + k^2}} \sin(kt + \theta) \quad (37)$$

令式(37)中的  $k$  分别等于  $\omega$ 、 $2\omega$ 、 $3\omega$ 、 $4\omega$ 、 $5\omega$  和  $6\omega$  可计算出  $3i_0$  中的基波幅值  $3I_{0-1}$  以及 2~6 次谐

波幅值  $3I_{0-i}$  ( $i=1,2,3,4,5,6$ ) 分别为

$$\left\{ \begin{aligned} 3I_{0-1} &= \frac{\Phi_{rA} + \Phi_{rB} + \Phi_{rC}}{L_{m2} + L_{\delta 1}} \frac{e^{-\pi/\tau} - e^{\pi/\tau}}{\pi\sqrt{(-1/\tau)^2 + \omega^2}} \\ 3I_{0-2} &= \frac{\Phi_{rA} + \Phi_{rB} + \Phi_{rC}}{L_{m2} + L_{\delta 1}} \frac{e^{-\pi/\tau} - e^{\pi/\tau}}{\pi\sqrt{(-1/\tau)^2 + 4\omega^2}} \\ 3I_{0-3} &= \frac{\Phi_{rA} + \Phi_{rB} + \Phi_{rC}}{L_{m2} + L_{\delta 1}} \frac{e^{-\pi/\tau} - e^{\pi/\tau}}{\pi\sqrt{(-1/\tau)^2 + 9\omega^2}} \\ 3I_{0-4} &= \frac{\Phi_{rA} + \Phi_{rB} + \Phi_{rC}}{L_{m2} + L_{\delta 1}} \frac{e^{-\pi/\tau} - e^{\pi/\tau}}{\pi\sqrt{(-1/\tau)^2 + 16\omega^2}} \\ 3I_{0-5} &= \frac{\Phi_{rA} + \Phi_{rB} + \Phi_{rC}}{L_{m2} + L_{\delta 1}} \frac{e^{-\pi/\tau} - e^{\pi/\tau}}{\pi\sqrt{(-1/\tau)^2 + 25\omega^2}} \\ 3I_{0-6} &= \frac{\Phi_{rA} + \Phi_{rB} + \Phi_{rC}}{L_{m2} + L_{\delta 1}} \frac{e^{-\pi/\tau} - e^{\pi/\tau}}{\pi\sqrt{(-1/\tau)^2 + 36\omega^2}} \end{aligned} \right. \quad (38)$$

取交流等值系统额定电压  $U_s = 110 \text{ kV}$ 、额定容量  $S_s = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$  以及阻抗角  $\varphi = 85^\circ$ , 则交流等值系统的电阻、电抗及电感为

$$\left\{ \begin{aligned} R_s &= U_s^2 / S_s \cos \varphi = 110^2 / 100 \times 0.087 = 10.527 \Omega \\ X_s &= U_s^2 / S_s \sin \varphi = 110^2 / 100 \times 0.996 = 120.516 \Omega \\ L_s &= X_s / \omega = 120.516 / (2 \times 3.14 \times 50) = 0.384 \text{ H} \end{aligned} \right. \quad (39)$$

取变压器额定容量  $S_T = 50 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 、变比  $110 \text{ kV} / 242 \text{ kV}$ , 查设备手册得空载电流百分比  $I_0\% = 0.9\%$ , 空载损耗  $P_0 = 67 \text{ kW}$ , 短路损耗  $P_k = 210 \text{ kW}$ , 阻抗电压  $U_k\% = 13\%$ , 则变压器  $110 \text{ kV}$  侧的电阻和电感计算式分别为

$$\left\{ \begin{aligned} L_{\delta 1} &= \frac{U_k\% / 100 (U_T^2 / S_T)}{\omega} = \frac{13 / 100 (110^2 / 50)}{2 \times 3.14 \times 50} = \\ &0.100 \text{ 2 H} \\ R_{\delta 1} &= \frac{P_k U_T^2}{S_T^2} = \frac{210 \times 110^2 \times 10^3}{(50 \times 10^3)^2} = 1.016 \text{ 4 } \Omega \end{aligned} \right. \quad (40)$$

$$\left\{ \begin{aligned} |Z_m| &= U_N / I_0 = \frac{110}{0.9\% \times (S_T / \sqrt{3} U_T)} = 46 \text{ 413.5 } \Omega \\ R_{m2} &= P_0 / I_0^2 = \frac{67 \times 10^3}{[0.9\% \times (S_T / \sqrt{3} U_T) \times 10^3]^2} = \\ &11 \text{ 928 } \Omega \\ X_m &= \sqrt{|Z_m|^2 - R_{m2}^2} = \sqrt{46 \text{ 413.5}^2 - 11 \text{ 928}^2} \approx \\ &44 \text{ 854.6 } \Omega \\ L_{m2} &= X_m / \omega = 44 \text{ 854.6} / (2 \times 3.14 \times 50) \approx 142.8 \Omega \end{aligned} \right. \quad (41)$$

则  $\tau = (L_s + L_{\delta 1} + L_{m2}) / (R_s + R_{\delta 1} + R_{m2}) = (0.384 + 0.100 \text{ 2} + 142.8) / (10.527 + 1.016 \text{ 4} + 11 \text{ 928}) \approx 0.012 \text{ s}$ ,  $\tau^2 \omega^2 \approx 14.2$ .

将这些参数代入式 (38) 得到励磁涌流情况下  $3i_0$  基波、2~6 次谐波及其占比如表 6 所示。

由上面分析结果可知: 励磁涌流情况下,  $3i_0$  中所含 2、3、4、5、6 次谐波占比均超过 15%, 本文接地保护会误动, 但通过图 16 (b) 配合逻辑可将该误动作闭锁。

表 6 励磁涌流情况下  $3i_0$  基波、2~6 次谐波及其占比  
Tab.6 Fundamental wave, 2nd, 3rd, ..., 6th harmonics and their proportions of  $3i_0$  under inrush current

基波和谐波	占比/%
基波 $3I_{0-1}$	100
2 次谐波 $3I_{0-2}$	50
3 次谐波 $3I_{0-3}$	33
4 次谐波 $3I_{0-4}$	25
5 次谐波 $3I_{0-5}$	20
6 次谐波 $3I_{0-6}$	17

### 2.3 CT 饱和情况下本文接地保护的動作性能分析

一次系统短路时, 电流增大且含有衰减非周期分量。由于衰减非周期分量很难传变到 CT 二次侧, 其主要作为励磁电流使 CT 饱和。图 18 为 CT 等值电路,  $i_1$ 、 $i_2$  和  $i_m$  为一、二次电流和励磁电流,  $L_m$ 、 $L_2$  和  $R_2$  为励磁电感、保护装置的等值电感和电阻。

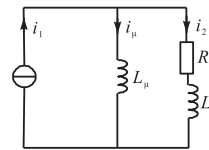


图 18 CT 的等效电路

Fig.18 Equivalent circuit of current transformer

设故障后一次系统 a 相电流  $i_{1a} = I_m e^{-t/\tau_1} - I_m \cos \omega t$ ,  $\tau_1$  为一次系统时间常数,  $I_m$  为基波幅值。考察最严重情况即非周期分量幅值与基波幅值相等, 设 a 相 CT 开始饱和的时间为  $t_a$ , 由文献[12] CT 二次侧电流为

$$i_{2a} = \begin{cases} I_m e^{-t/\tau_1} + I_m \sin \omega t & -\frac{\alpha}{\omega} \leq t \leq t_a \\ (I_m e^{-t/\tau_1} + I_m \sin \omega t) e^{-(t-t_a)/\tau_2} & t_a < t < \frac{T}{2} + \frac{\alpha}{\omega} \\ I_m e^{-t/\tau_1} + I_m \sin \omega t & \frac{T}{2} + \frac{\alpha}{\omega} \leq t \leq T - \frac{\alpha}{\omega} \\ 0 & T - \frac{\alpha}{\omega} < t < T \end{cases} \quad (42)$$

式中:  $\tau_2 = (L_m + L_2) / R_2$  为 CT 二次回路时间常数;  $\alpha = \arcsin(I_m e^{-t/\tau_1} / I_m) = \arcsin e^{-t/\tau_1}$ .

在不计 CT 二次等值漏抗  $L_2$  情况下, 图 18 中励磁支路和二次绕组的两端电压相等, 由法拉第电磁感应定律得

$$N_2 [d\Phi_{\mu a}/dt] = i_{2a} R_2 \quad (43)$$

式中的  $\Phi_{\mu a}$  为铁芯磁通. 铁芯未饱和时  $i_{2a} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) i_{1a}$ ,

将其与  $i_{1a} = I_m e^{-t/\tau_1} - I_m \cos \omega t$  代入式(43)得

$$\Phi_{\mu a} = \Phi_{ra} + \frac{I_m (N_1/N_2) R_2}{\omega N_2} [\omega \tau_1 (1 - e^{-t/\tau_1}) - \sin \omega t] = \Phi_{ra} + \Phi_m [\omega \tau_1 (1 - e^{-t/\tau_1}) - \sin \omega t] \quad (44)$$

式中:  $\Phi_{ra}$  为剩磁,  $\Phi_m = [I_m (N_1/N_2) R_2] / (\omega N_2)$  为正常运行时的磁通峰值;  $N_1$ 、 $N_2$  为 CT 一、二次线圈匝数.

当  $\Phi_{\mu a} = \Phi_{sat}$  ( $\Phi_{sat}$  为饱和磁通) 时铁芯开始饱和, 此时的  $t = t_a$ , 由于 CT 快速达到饱和  $t_a$  很小,  $t_a/\tau_1$  趋于 0, 根据数学里等价无穷小的概念  $1 - e^{-t_a/\tau_1}$  与  $t_a/\tau_1$  等价<sup>[12]</sup>, 于是式(44)成为

$$(\Phi_{sat} - \Phi_{ra}) / \Phi_m = \omega \tau_1 (1 - e^{-t_a/\tau_1}) - \sin \omega t_a \approx$$

$$i_{2b} = \begin{cases} I_m e^{-t/\tau_1} + I_m \sin(\omega t - 120^\circ) & -\alpha/\omega \leq t \leq t_b \\ [I_m e^{-t/\tau_1} + I_m \sin(\omega t_b - 120^\circ)] e^{-(t-t_b)/\tau_2} & t_b < t < T/2 + \alpha/\omega \\ I_m e^{-t/\tau_1} + I_m \sin(\omega t - 120^\circ) & T/2 + \alpha/\omega \leq t \leq T - \alpha/\omega \\ 0 & T - \alpha/\omega < t < T \end{cases}$$

与 a 同理理, 由励磁支路和 CT 二次绕组的两端电压相等得

$$\frac{\Phi_{sat} - \Phi_{rb}}{\Phi_m} \approx \omega t_b - \sin(\omega t_b - 120^\circ) \quad (48)$$

$$i_{20} = i_{2a} + i_{2b} + i_{2c} = \begin{cases} 3I_m e^{-t/\tau_1} + I_m [\sin \omega t + \sin(\omega t - 120^\circ) + \sin(\omega t + 120^\circ)] = 3I_m e^{-t/\tau_1} & -\frac{\alpha}{\omega} \leq t < 1.15 \text{ ms} \\ 2I_m e^{-t/\tau_1} + I_m [\sin \omega t + \sin(\omega t + 120^\circ)] + [I_m e^{-t/\tau_1} + I_m \sin(\omega t_b - 120^\circ)] e^{-(t-1.15)/\tau_2} & 1.15 \text{ ms} \leq t < 3.82 \text{ ms} \\ I_m e^{-t/\tau_1} + I_m \sin \omega t + [I_m e^{-t/\tau_1} + I_m \sin(\omega t_b - 120^\circ)] e^{-(t-1.15)/\tau_2} + [I_m e^{-t/\tau_1} + I_m \sin(\omega t_c + 120^\circ)] e^{-(t-3.82)/\tau_2} & 3.82 \text{ ms} \leq t < 3.98 \text{ ms} \\ (I_m e^{-t/\tau_1} + I_m \sin \omega t_a) e^{-(t-3.82)/\tau_2} + [I_m e^{-t/\tau_1} + I_m \sin(\omega t_b - 120^\circ)] e^{-(t-1.15)/\tau_2} + [I_m e^{-t/\tau_1} + I_m \sin(\omega t_c + 120^\circ)] e^{-(t-3.82)/\tau_2} & 3.98 \text{ ms} \leq t < 10.00 \text{ ms} + \frac{\alpha}{\omega} \\ 3I_m e^{-t/\tau_1} + I_m [\sin \omega t + \sin(\omega t - 120^\circ) + \sin(\omega t + 120^\circ)] = 3I_m e^{-t/\tau_1} & 10.00 \text{ ms} + \frac{\alpha}{\omega} \leq t < 20.00 \text{ ms} - \frac{\alpha}{\omega} \\ 0 & 20.00 \text{ ms} - \frac{\alpha}{\omega} \leq t < 20.00 \text{ ms} \end{cases} \quad (49)$$

根据国家标准 GB1984—2014<sup>[14]</sup>, 额定电压 72.5 ~ 363.0 kV 系统的时间常数为 60 ms, 因此本文 110 kV 系统取  $\tau_1 = 60$  ms. 根据 DL/T866—2015《电流互感器和电压互感器选择及计算规程》<sup>[15]</sup>, 66 ~ 220 kV 变压器零序电流保护用电流互感器宜采用 P 级互感器; 现有资料没有明确给出 P 级电流互感器二次回路的时间常数, 但 GB16847—1997《保护用

$$\omega \tau_1 (t_a/\tau_1) - \sin \omega t_a = \omega t_a - \sin \omega t_a \quad (45)$$

可见, 影响  $t_a$  的因素为  $\Phi_{sat}/\Phi_m$  和  $\Phi_{ra}/\Phi_m$ .  $\Phi_{sat}/\Phi_m$  越大, 开始饱和的时间  $t_a$  越长;  $\Phi_{ra}/\Phi_m$  越大, 开始饱和的时间  $t_a$  越短. 由于  $t_a$  越小 CT 饱和程度越深, 因此考虑 CT 饱和最严重情况取  $\Phi_{sat}/\Phi_m$  最小值和  $\Phi_{ra}$  最大值的情况分析. 结合工程实际情况和文献[13], 取  $\Phi_{sat}/\Phi_m = 1$  和  $\Phi_{ra} = 70\% \Phi_{sat}$  代入式(45)求得  $t_a = 3.98$  ms.

对于三相系统而言, 设发生三相短路后的一次侧电流为

$$\begin{cases} i_{1a} = I_m e^{-t/\tau_1} - I_m \cos \omega t \\ i_{1b} = I_m e^{-t/\tau_1} - I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \\ i_{1c} = I_m e^{-t/\tau_1} - I_m \cos(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (46)$$

根据式(42)可知  $i_{2b}$  饱和后的表达式为

$$\begin{cases} -\alpha/\omega \leq t \leq t_b \\ t_b < t < T/2 + \alpha/\omega \\ T/2 + \alpha/\omega \leq t \leq T - \alpha/\omega \\ T - \alpha/\omega < t < T \end{cases} \quad (47)$$

取  $\Phi_{sat}/\Phi_m = 1$ 、 $\Phi_{rb} = 70\% \Phi_m \cos(-120^\circ) = -0.35 \Phi_m$ , 代入式(48)得 b 相开始饱和的时间  $t_b = 1.15$  ms.

同理可求出 c 相开始保护的时间为  $t_c = 3.82$  ms. 因此有

电流互感器暂态特性技术要求》<sup>[16]</sup>指出“P 级电流互感器的性能要求是按照对称正弦一次电流所规定的, 在使用时可按 TPS 级电流互感器同样对待”; 文献[15]给出 TPS 级电流互感器二次回路时间常数为几秒到十余秒. 因此, 本文分析中的 110 kV 系统选用 P 级电流互感器, 取  $\tau_2 = 10$  s.

由  $\tau_1 = 60$  ms 计算得到  $\alpha = \arcsin(I_m e^{-t/\tau_1} / I_m) =$

$\arcsin(0.7165) = 45.8^\circ$ ,  $-\alpha/\omega = -2.50 \text{ ms}$ , 将  $\tau_1 = 60 \text{ ms}$ 、 $\tau_2 = 10 \text{ s}$ 、 $-\alpha/\omega = -2.50 \text{ ms}$  代入式(49)有

$$i_{20} = i_{2a} + i_{2b} + i_{2c} = \begin{cases} 3I_m e^{-t/0.06} & -2.50 \text{ ms} \leq t < 1.15 \text{ ms} \\ 2I_m e^{-t/0.06} + I_m [\sin \omega t + \sin(\omega t + 120^\circ)] + \\ \quad [I_m e^{-t/0.06} + I_m \sin(\omega t_b - 120^\circ)] e^{-(t-1.15)/10} & 1.15 \text{ ms} \leq t < 3.82 \text{ ms} \\ I_m e^{-t/0.06} + I_m \sin \omega t + [I_m e^{-t/0.06} + I_m \sin(\omega t_b - 120^\circ)] e^{-(t-1.15)/10} + \\ \quad [I_m e^{-t/0.06} + I_m \sin(\omega t_c + 120^\circ)] e^{-(t-3.82)/10} & 3.82 \text{ ms} \leq t < 3.98 \text{ ms} \\ (I_m e^{-t/0.06} + I_m \sin \omega t_a) e^{-(t-3.98)/10} + [I_m e^{-t/0.06} + I_m \sin(\omega t_b - 120^\circ)] e^{-(t-1.15)/10} + \\ \quad [I_m e^{-t/0.06} + I_m \sin(\omega t_c + 120^\circ)] e^{-(t-3.82)/10} & 3.98 \text{ ms} \leq t < 12.50 \text{ ms} \\ 3I_m e^{-t/0.06} & 12.50 \text{ ms} \leq t < 17.50 \text{ ms} \\ 0 & 17.50 \text{ ms} \leq t < 20.00 \text{ ms} \end{cases} \quad (50)$$

利用全波傅里叶算法对式(50)进行计算, 得到 CT 饱和最严重情况下二次侧的零序电流基波  $I_{20-1}$ 、2~6 次谐波 ( $I_{20-2}$ 、 $I_{20-3}$ 、 $I_{20-4}$ 、 $I_{20-5}$  和  $I_{20-6}$ ) 及 2~6 次谐波占比如表 7 所示. 可见, 只有 2 次谐波占比高于 15%, 3~6 次谐波占比均低于 15%, 本文接地保护不会误动作.

表 7 CT 饱和最严重情况下  $i_{20}$  基波、2~6 次谐波及占比  
Tab.7 Fundamental wave, 2nd, 3rd, ..., 6th harmonics and their proportions of  $i_{20}$  under CT saturation (the most severe condition)

幅值	占比/%
$I_{20-1} = 0.24171I_m$	100
$I_{20-2} = 0.10514I_m$	44
$I_{20-3} = 0.01982I_m$	8
$I_{20-4} = 0.00193I_m$	1
$I_{20-5} \approx 0$	$\approx 0$
$I_{20-6} \approx 0$	$\approx 0$

### 3 仿真验证

基于 PSCAD/EMTDC 搭建了图 1 直流输电系统仿真模型, 交流等值系统额定电压为 110 kV, 容量 100 MV·A. 换流变压器额定功率 50 MV·A, 额定电压 110/66 (kV), 正序漏抗 0.18 p.u.. 直流系统额定电压 500 kV. 整流侧采用定电流和最小  $\alpha$  控制, 逆变侧定电流和定熄弧角控制. 故障发生时间与图 2 的  $C_2$  点之后  $\alpha + \mu$  相对应, 仿真时设置  $t = 0.515 \text{ s}$  故障.

交流等值系统阻抗  $X_s$ 、换流变压器阻抗  $X_T$  和阀侧绕组出口三相短路总阻抗  $X$  分别为

$$\begin{cases} X_s = \frac{E^2}{S_s} = \frac{110^2}{100} = 121 \Omega \\ X_T = \frac{U_k \% U_{IN}^2}{100 S_T} = 0.18 \times \frac{110^2}{50} = 43.56 \Omega \\ X = X_s + X_T = 121 + 43.56 = 164.56 \Omega \end{cases} \quad (51)$$

低压桥阀侧绕组出口三相短路电流  $I_{k,max} = E/(\sqrt{3}|X|) = (110\sqrt{3}/493.68) \text{ kA}$ , 最大不平衡电流  $I_{unb,max} = 15\%I_{k,max} \approx 0.058 \text{ kA}$ , 零序过流保护整定值  $3I_{0set} = K_{rel}I_{unb,max} = 1.15 \times 0.058 \text{ kA} = 66.7 \text{ A}$ .

**算例 1** 低压桥换流变压器阀侧绕组  $f$  点发生单相接地, 其网侧电流  $i_{3i}$  ( $i = a, b, c$ )、阀侧电流  $i_{4j}$  ( $j = A, B, C$ )、零序电流  $3i_{0(Y)}$ 、差动电流  $i_{diffY}$  均示于图 19 中. 图 19(c) 仿真得到的  $3i_{0(Y)}$  与理论分析得到的图 15 吻合, 图 19(d) 仿真的  $i_{diffY}$  与理论分析得到的图 6 吻合.

$3i_{0(Y)}$  和  $i_{diffY}$  的谐波分解及  $3i_{0(Y)}$  的频谱示于图 20.  $3i_{0(Y)}$  的基波幅值为  $53.8 \text{ A} < 3I_{0set}$  ( $66.7 \text{ A}$ ), 现有零序过流保护拒动;  $i_{diffYa}$  基波幅值为  $1.12 \text{ p.u.} > I_{Yset}$  ( $0.38 \text{ p.u.}$ ), 但 2 次谐波含量  $I_{diffYa-2}/I_{diffYa-1} = 24.3\% > 15\%$ , 差动保护闭锁; 零序电流中的 2 次、3 次、4 次、5 次和 6 次谐波占比均超过 15%, 本文接地保护动作. 保护出口逻辑图 16(b) 中的“与 2”输出 1, 保护动作.

**算例 2** 图 21 为空载合闸时产生励磁涌流的仿真结果. 饱和特性参数设置如下: 空心电抗为  $0.2 \text{ p.u.}$ , 膝点电压为  $1.25 \text{ p.u.}$ , 励磁涌流百分数为  $1.0\%$ .  $i_{diffY}$  基波幅值  $I_{diffY-1} > I_{Yset}$  ( $0.38 \text{ p.u.}$ ), 差动保护误动;  $3i_{0(Y)}$  中 2~6 次谐波占比均大于 15%, 本文接地保护误动;  $3i_{0(Y)}$  的基波幅值为  $3I_{0(Y)-1}$  ( $15.7 \text{ A}$ )  $< 3I_{0set}$  ( $66.7 \text{ A}$ ), 零序过流保护不动作. 保护出口逻辑图 16(b) 中的“与 2”输出 0, 保护闭锁.

**算例 3** 图 22 为低压桥换流变压器区外三相短路导致 CT 饱和的仿真结果.  $I_{diffY-1} < I_{Yset}$  ( $0.38 \text{ p.u.}$ ),  $3I_{0(Y)-1}$  ( $4.3 \text{ A}$ )  $< 3I_{0set}$  ( $66.7 \text{ A}$ ),  $3i_{0(Y)}$  中 3~6 次谐波均小于 15%, 差动保护、本文接地保护及零序过流保护均不动作, 图 16(b) “与 2”输出 0, 保护不误动.

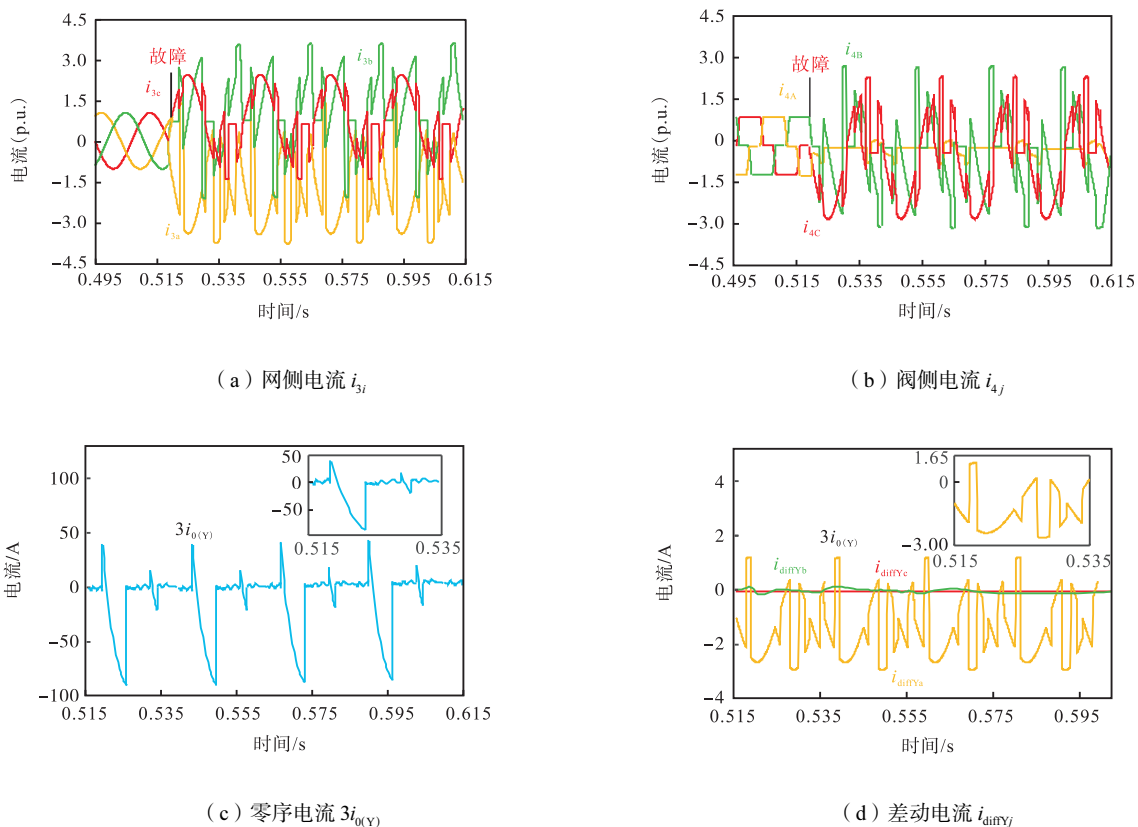


图 19 低压桥换流变压器阀侧单相接地仿真结果

Fig.19 Simulation results of single-phase grounding on the valve-side of low-voltage bridge converter transformer

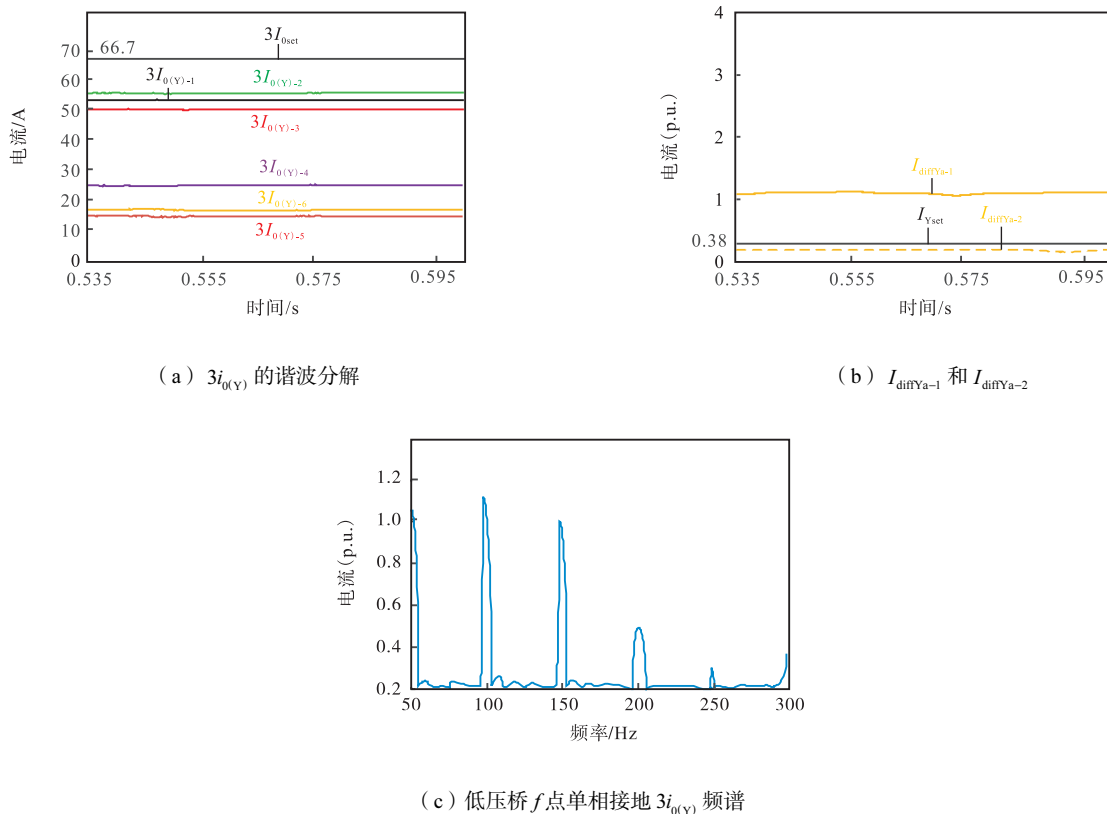


图 20  $3i_{0(Y)}$  和  $i_{diffYj}$  的谐波分解及  $3i_{0(Y)}$  频谱

Fig.20  $3i_{0(Y)}$  and  $i_{diffYj}$  harmonic decomposition and  $3i_{0(Y)}$  spectra

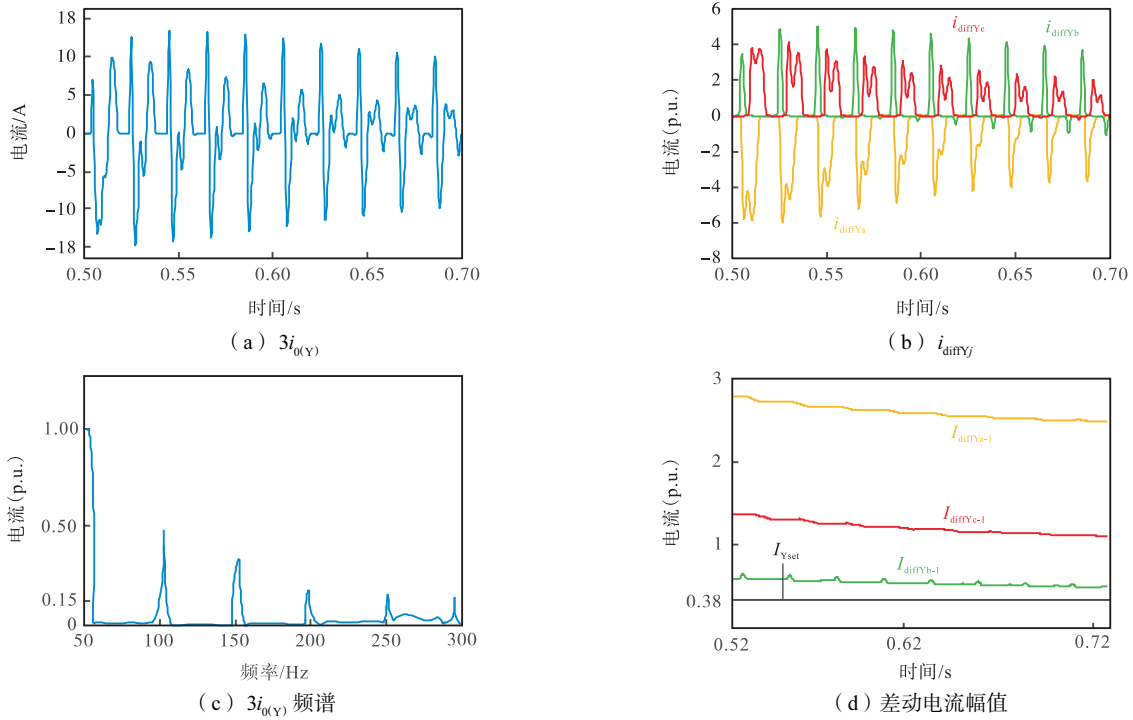


图 21 空载合闸时产生励磁涌流的仿真结果

Fig.21 Simulation results of excitation inrush current generated during no-loading closing

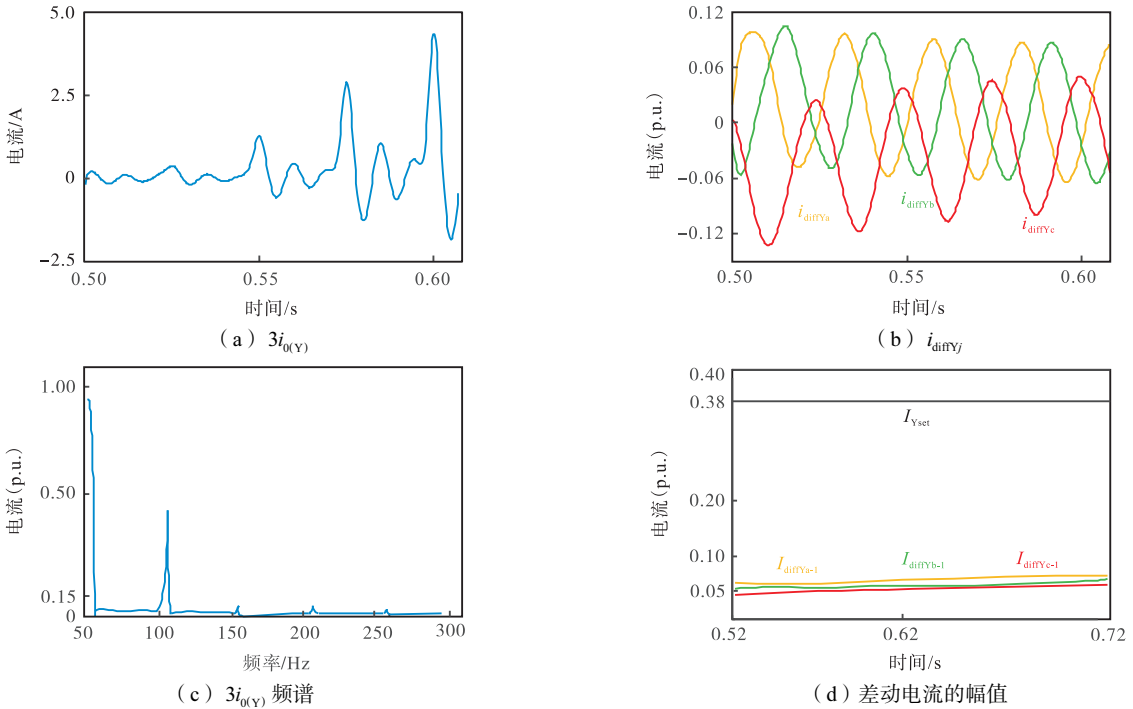


图 22 低压桥换流变压器区外三相短路导致 CT 饱和的仿真结果

Fig.22 Simulation results of CT saturation caused by three-phase short-circuit outside the LV bridge converter transformer area

### 4 结 语

针对实际工程中换流变压器阀侧绕组单相接地时差动保护出现的拒动情况,本文采用时段划分法分析了阀侧绕组单相接地的故障特性以及对差动保护、

零序过流保护的影响. 由于换流器工作的非线性, 低压桥换流变压器阀侧绕组单相接地后, 差动电流中 2 次谐波高于 15% 会导致差动保护误闭锁, 零序电流基波幅值低于整定值会导致零序过流保护拒动.

本文提出一种接地保护方法, 利用低压桥换流变压器阀侧绕组单相接地时零序电流中 2~6 次谐波占

比均大于 15%反映这种故障,能弥补实际工程中阀侧绕组单相接地时差动保护的拒动。该接地保护与差动保护、零序过流保护互为补充,可反映换流变压器内部所有故障,提升保护的整体性能。

#### 参考文献:

- [1] Zheng T, Liu X X, Guo X C. Analysis of fault induced inrush current of converter transformer in LCC HVDC system considering DC control and protection[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 125: 106536.
- [2] 翁汉琮, 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 (in Chinese).
- [3] 林磊, 陈川, 胡鑫, 等. 不同故障下特高压换流变压器差动保护动作特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 123-133. Lin Lei, Chen Chuan, Hu Xin, et al. Research on the characteristics of ultra-high voltage converter transformer differential protection under the internal and external faults[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 123-133 (in Chinese).
- [4] 张艳霞, 张富贺, 卢静怡, 等. 一种防止换流变压器阀侧单相接地时差动保护误闭锁的方案[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2388-2395. Zhang Yanxia, Zhang Fuhe, Lu Jingyi, et al. Novel solution to prevent differential protection mal-blocking of converter transformer at single-phase grounding fault at valve side[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2388-2395 (in Chinese).
- [5] 韩昆仑, 蔡泽祥, 李佳曼, 等. 考虑直流控制的换流器交流侧故障及其保护动作行为分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2531-2540. Han Kunlun, Cai Zexiang, Li Jiaman, et al. Analysis of fault on the AC side of converter and action of converter protection considering DC control[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2531-2540 (in Chinese).
- [6] 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 (in Chinese).
- [7] 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 (in Chinese).
- [8] 朱佳, 李银红, 李明, 等. 计及故障持续时间的换流变压器阀侧单相接地故障分析[J]. 南方电网技术, 2014, 8(5): 24-28. Zhu Jia, Li Yinhong, Li Ming, et al. Analysis on single-phase grounding fault at converter transformer valve side considering fault duration[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(5): 24-28 (in Chinese).
- [9] Yang C H, Xue Y, Zhang X P. More efficient AC filterless flexible LCC HVDC by analyzing the impact of single-phase fault on commutations[J]. IEEE Access, 2021, 9(1): 7643-7654.
- [10] 朱佳. 高压直流输电系统换流器区故障特性分析及应对策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学电气与电子工程学院, 2018. Zhu Jia. Characteristics Analysis and Countermeasures Study of Converter Faults in HVDC Systems[D]. Wuhan: School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 2018 (in Chinese).
- [11] 黄少锋, 申洪明, 刘玮, 等. 交直流互联系统对换流变压器差动保护的影响分析及对策[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 158-164. Huang Shaofeng, Shen Hongming, Liu Wei, et al. Effect of AC/DC interconnected network on transformer protection and its countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 158-164 (in Chinese).
- [12] 同济大学数学科学学院. 高等数学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2019. School of Mathematical Sciences, Tongji University. Advanced Mathematics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2019 (in Chinese).
- [13] 许正亚. 变压器及中低压网络数字式保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. Xu Zhengya. Digital Protection for Power Transformer and Medial-Low Voltage Electric Power Net[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2004 (in Chinese).
- [14] 西安高压电器研究院有限公司. GB 1984—2014 高压交流断路器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd. GB 1984—2014 AC High-Voltage Circuit Breaker[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014 (in Chinese).
- [15] 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司. DL/T866—2015 电流互感器和电压互感器选择及计算规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group. DL/T866—2015 Code for Selection and Calculation of Current Transformer and Voltage Transformer[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015 (in Chinese).
- [16] 国家技术监督局. GB 16847—1997 保护用电流互感器暂态特性技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997. The State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB 16847—1997 Requirements for Protective Current Transformers for Transient Performance[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997 (in Chinese).

(责任编辑: 孙立华)