

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

郑涛, 胡鑫

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要:从磁链变化角度分析特高压换流变压器(简称换流变)阀侧发生单相接地故障时由换流阀单向导通性引起的励磁涌流(定义为故障性涌流)的产生机理和变化特点。以特高压直流输电系统中某一换流变为例,分析故障性涌流对换流变差动保护动作特性的影响。研究表明,故障性涌流容易导致换流变区外故障转区内时差动保护误闭锁。针对该问题,进一步分析发现,由于换流阀的单向导通性使得转换性故障发生后差动电流的直流分量存在由负极性到正极性反转的特征,进而利用该特征提出换流变差动保护闭锁逻辑改进判据。仿真结果证明了所提判据的可靠性。

关键词:特高压输电;换流变压器;故障性涌流;差动电流;差动保护

中图分类号:TM 773

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.05.016

0 引言

作为特高压直流输电系统中最主要的设备之一,换流变压器(下文简称换流变)是连接在交流系统与换流桥之间的电力变压器,通过换流变可以在较大范围内调节交流电压,使系统运行在最佳状态^[1-2],因此,换流变能否可靠稳定地运行将直接影响整个直流输电系统运行的可靠性。换流变最常见的故障是各种类型的短路故障,从短路故障位置的角度分类,可以将换流变短路故障分为换流变网侧区内/外短路故障、换流变阀侧区内/外短路故障及相关的转换性故障等。目前,对特高压换流变普遍采用基于二次谐波制动原理的差动保护^[3-5]。

高压直流输电系统中,与换流变阀侧直接相连的换流器是非线性元件,且换流阀具有单向导通性,因而在换流变阀侧发生故障后,故障电流出现半波电流大、半波电流小的不对称现象^[6-8],从而给差动保护带来不利影响。针对上述现象,文献[9]通过在整流侧阀短路故障、直流侧出口短路故障、交流侧单相接地短路故障等不同故障情况下建立不同的等效故障分析模型,研究了换流阀的单向导通性对换流器保护动作特性的影响;文献[10]则通过建立回路叠加的换流器故障分析电路,对系统交流侧故障时换流器保护的动态响应特性进行了分析。但文献[9-10]只考虑了交直流故障下换流器的相应保护,对故障情况下换流变差动保护的研究则相对欠缺。另外,文献[11]列举了换流变的独有特性,并简单分析了换流变阀侧区内故障时差动电流的特点,但未对相应故障情况进行详细的仿真分析及验证。文

献[12]在文献[11]的基础上,指出由于换流阀是单向导通的,因此在换流变阀侧故障后,导致故障电流正负半波不对称,从而导致差动电流二次谐波含量增大,继而可能引起差动保护闭锁,并进行了相应的仿真分析,但由于文献[12]研究内容极其广泛,并未对换流变阀侧故障出现的具体现象进行详细解释,也没有考虑半周不对称的故障电流是否会导致换流变铁芯饱和问题。

本文从磁链变化的角度,分析特高压换流变故障性涌流的产生机理和变化特点,并在此基础上进一步分析了计及故障性涌流影响的换流变差动保护的动作特性。研究表明当换流变阀侧发生区外转区内单相接地短路故障时差动保护存在拒动的风险。针对该问题,本文在二次谐波制动原理的基础上提出了基于差动电流直流分量的换流变差动保护新判据,此判据能有效识别因故障性涌流造成的保护误闭锁,确保差动保护的可靠性。

1 故障性涌流的产生机理

1.1 换流变差动保护配置

现有的特高压直流输电系统多采用单极双 12 脉动的主接线方式^[13],双 12 脉动换流器的故障特征与单个 12 脉动换流器相似,双 12 脉动的换流器保护是以 1 个 12 脉动换流器为单元进行单独配置,2 个 12 脉动换流器的保护分区相互独立。作为系统的重要组成部分,换流变的差动保护配置同样以 12 脉动为基本单元。图 1 所示为单个 12 脉动换流变差动保护主保护配置,所配置的保护包括大差保护和单台换流变的小差保护。为防止涌流引起误动,目前大多采用基于二次谐波制动的差动保护闭锁方案。

1.2 换流变阀侧接地故障特征

换流器各换流阀在 1 个换相周期内有 6 种不同

收稿日期:2018-05-21;修回日期:2019-03-28

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(2016YFB0900604)

Project supported by the Key Project of Smart Grid Technology and Equipment of National Key Research and Development Plan of China(2016YFB0900604)

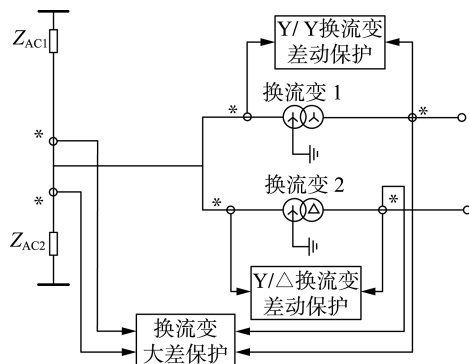


图 1 12 脉动换流变差动保护配置图

Fig.1 Differential protection configuration of 12 pulse converter transformer

的导通状态,以图 1 所示的 Y/Y 接线换流变为例,在阀侧发生 A 相单相接地故障后,应分 6 种不同的情况进行分析。为了进一步得到故障期间的短路电流流通路径,又将这 6 种状态分为 3 类^[14]。

- 第 1 种状态:与故障相相连的共阴极阀导通。
 - 第 2 种状态:与故障相相连的 2 个阀均不导通。
 - 第 3 种状态:与故障相相连的共阳极阀导通。
- 这 3 类状态在 1 个换相周期内相互转换。

上述 3 类状态下的故障分析模型分别如图 2—4 所示。图中, I_{dh} 、 I_{dn} 分别为高压母线电流、直流中性线电流;实线、虚线箭头分别表示上、下桥臂的短

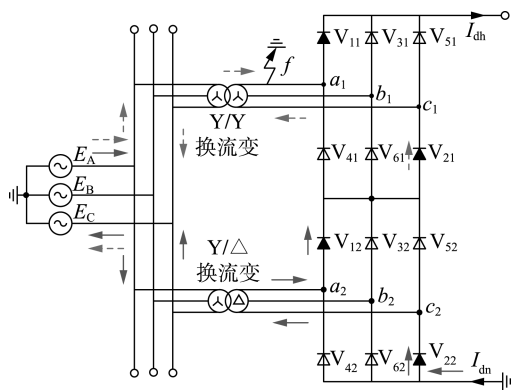


图 2 第 1 种状态的故障分析模型

Fig.2 Fault analysis model under State 1

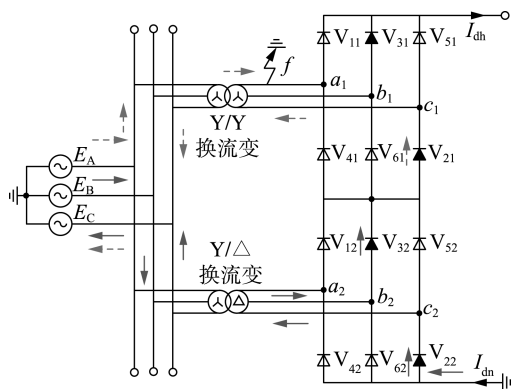


图 3 第 2 种状态的故障分析模型

Fig.3 Fault analysis model under State 2

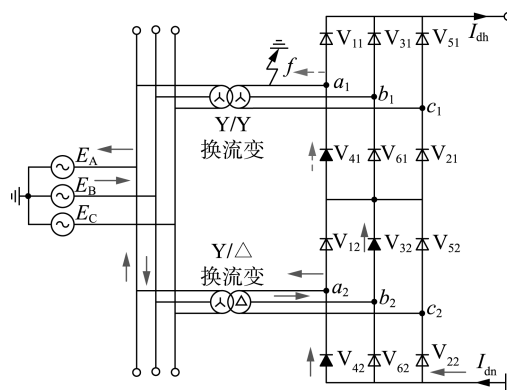


图 4 第 3 种状态下的故障分析模型

Fig.4 Fault analysis model under State 3

路电流流通路径。为便于分析,规定以流入换流变方向为正方向。

第 1 种状态下的换流器导通情况如图 2 所示,即与故障相相连的共阴极阀 V_{11} 导通,共阳极阀以 V_{21} 导通为例。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,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,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。

图 3 为第 2 种状态下的换流器导通示意图,即导通的阀均与非故障相相连。以 V_{31} 和 V_{21} 导通为例,通过与图 2 的对比可得,2 种状态下导通的换流阀以及短路流通路径不一致,但流经短路回路的短路电流特征相同。

图 4 为第 3 种状态下的换流器导通示意图,即与故障相相连的共阳极阀 V_{41} 导通,共阴极阀则以 V_{31} 导通为例。由图中箭头可知,此状态下短路电流不流经 Y 桥换流变,但短路电流仍流经换流阀,故短路电流仍然存在偏向时间轴一侧这一特征。因此对于上述 Y/Y 换流变,故障相 A 相阀侧电流将出现上述故障电流特征。

根据上述分析可知,在第 1 种和第 2 种状态下,短路电流流经 A 相网侧,且为流入换流变方向,此时 A 相网侧电流位于时间轴上方,且幅值很大,而此时阀侧电流不含故障电流,幅值较小;在第 3 种状态下,短路电流流经 A 相阀侧,为流入换流变方向,此时 A 相阀侧电流以较高幅值位于时间轴上方,而此时网侧电流幅值较小。在 1 个换相周期内,这 3 类状态相互转换,因此在故障发生后,A 相网侧和阀侧电流将出现严重的正负半波不对称现象。附录中的图 A1 为并联运行变压器产生和应涌流的等效电路图,根据和应涌流的产生机理可知^[15],A 相网侧电

流的正负半波不对称容易导致换流变铁芯半周饱和,继而产生励磁涌流,对换流变差动保护产生极其不利的影响。

1.3 故障性涌流的产生机理

当换流变阀侧发生单相接地故障时,以A相为例,根据1.1节的理论分析可知,A相网侧电流呈现严重的正负半波不对称的现象,波形偏向时间轴的一侧。因此,电流中的直流分量将导致换流变端电压产生非周期偏移,从而导致换流变发生半周饱和,进而产生幅值较大的励磁涌流,为与普通的“励磁涌流”相区别,将此励磁涌流现象称为“故障性涌流”。

换流变等效电路图如图5所示。图中, U_s 、 i_s 、 R_s 和 L_s 分别为系统电压、系统电流、系统电阻和系统电感; R_1 、 L_1 分别为换流变 T_3 网侧等效电阻和电感; B 为换流变端点; i_1 为换流变 T_3 网侧电流。令 $i_s = i_1 + i_l$ 、 $i_l = i_{m1} + i_{r1}$,其中 i_{m1} 为换流变励磁电流, i_{r1} 为不考虑铁芯饱和时的换流变网侧电流,即换流变的副边电流, i_l 为除 T_3 外其他各换流变网侧电流之和。正常情况下流过换流变的励磁涌流 i_{m1} 幅值相对较小,为便于分析,在 T_3 故障前,令 $i_{m1} = 0$ 。

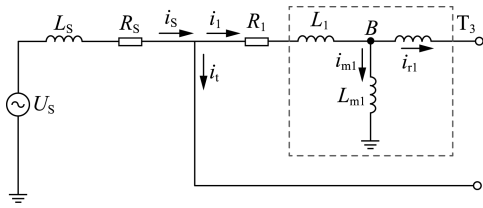


图5 换流变等效电路图

Fig.5 Equivalent circuit diagram of converter transformer

在 T_3 阀侧出现单相接地故障后, T_3 网侧电流 i_1 呈现故障电流特征,即幅值增大,且正负半波不对称,波形偏向时间轴一侧,在 T_3 故障性涌流产生之前,有 $i_{m1} \approx 0$ 、 $i_l \approx i_{r1}$,此时对 T_3 列电压平衡方程为:

$$\frac{d\psi_1}{dt} = U_s - L_s \frac{di_s}{dt} - R_s i_s - L_1 \frac{di_{r1}}{dt} - R_1 i_{r1} \quad (1)$$

其中, ψ_1 为 T_3 磁链。

考虑1个周期,对式(1)两边积分得:

$$\begin{aligned} \psi_1(2\pi) = & \int_0^{2\pi} U_s(\theta) d\theta - L_s(i_s(2\pi) - i_s(0)) - \\ & R_s \int_0^{2\pi} i_s(\theta) d\theta - L_1(i_{r1}(2\pi) - i_{r1}(0)) - \\ & R_1 \int_0^{2\pi} i_{r1}(\theta) d\theta + \psi_1(0) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $U_s(\theta)$ 为正弦电压源,且 $i_s(\theta)$ 和 $i_{r1}(\theta)$ 变换周期都是换流器的1个换相周期,即为0.02s,所以有 $i_s(2\pi) = i_s(0)$ 、 $i_{r1}(2\pi) = i_{r1}(0)$ 。则由式(2)得:

$$\begin{aligned} \psi_1(2\pi) = & \psi_1(0) - R_s \int_0^{2\pi} (i_l(\theta) + i_{r1}(\theta)) d\theta - \\ & R_1 \int_0^{2\pi} i_{r1}(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $i_l(\theta)$ 为其他正常运行换流变网侧电流之和,因此其在1个工频周期内积分也为0,则由式(3)可得:

$$\psi_1(2\pi) = \psi_1(0) - (R_s + R_1) \int_0^{2\pi} i_{r1}(\theta) d\theta \quad (4)$$

由式(4)可得 T_3 磁链的变化主要是由于故障电流 i_{r1} 在电阻上1个周期的积分决定的,因此 T_3 磁链在每个周期的增量为:

$$\Delta\psi_1 = -(R_s + R_1) \int_0^{2\pi} i_{r1}(\theta) d\theta \quad (5)$$

由于 i_{r1} 是位于时间轴上方的,由式(5)可以看出, $\Delta\psi_1$ 为负, T_3 磁链反方向增加,逐渐达到饱和点。在没有达到饱和点之前, i_{m1} 的幅值较小。随着 T_3 中不断积累负向偏磁, ψ_1 在一段时间后会有一部分进入饱和区,从而产生涌流,方向与 i_{r1} 相反,有间断角,此类涌流由故障电流产生,因此称其为故障性涌流,且产生原理及波形特征类似于和应涌流。随着 T_3 磁链继续反方向增大,故障性涌流 i_{m1} 也越来越大,间断角减小。

当 T_3 中出现故障性涌流之后,磁链 ψ_1 的变化则由 i_{r1} 和 i_{m1} 共同决定,此时有:

$$\Delta\psi_1 = -(R_s + R_1) \int_{\theta}^{\theta+2\pi} (i_{r1}(\theta) + i_{m1}(\theta)) d\theta \quad (6)$$

由于 i_{m1} 和 i_{r1} 在幅值是相反的,所以 i_{m1} 的出现使得 ψ_1 反方向增加的趋势减缓,直到在1个周期中 i_{m1} 和 i_{r1} 在电阻上的压降可以抵消时, $\Delta\psi_1 = 0$ 。此时 T_3 的磁链 ψ_1 反方向增大到最大,故障性涌流 i_{m1} 也逐渐增大到最大,并一直维持。换流变副边电流 i_{r1} 及故障性涌流 i_{m1} 如图6所示。图中,故障时刻 $t = 0.4$ s,故障类型为换流变阀侧单相接地故障。

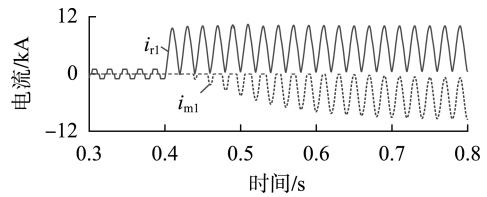


图6 换流变故障性涌流

Fig.6 Fault inrush current of converter transformer

如图6所示,故障性涌流是在换流变阀侧单相故障发生一段时间后产生,有间断角,波形方向与换流变副边电流相反,即与网侧电流方向相反,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,并一直维持,与理论分析一致。

2 故障性涌流对换流变差动保护的影响分析

2.1 换流变阀侧区外故障

当换流变阀侧发生区外单相故障时,短路电流流经换流阀,阀的单向导通性使故障相网侧电流和

阀侧电流出现严重的正负半波不对称现象,而网侧电流的正负半波不对称容易导致换流变铁芯半周饱和,继而产生故障性涌流。此时换流变差动电流即为故障性涌流,初始阶段的差动电流较小,随着故障性涌流的产生和发展,差动电流逐渐增大,但由于故障性涌流的二次谐波含量较大,差动保护能够可靠闭锁。

2.2 换流变阀侧区内故障

当换流变阀侧发生区内单相故障时,由于短路电流流通路径与发生阀侧区外故障时相同,网侧电流和阀侧电流同样会出现正负半波不对称现象,继而产生故障性涌流。由于故障性涌流初始阶段的幅值较小,因此在区内故障发生后,差动电流主要取决于区内故障电流,受故障性涌流影响较小,差动电流谐波含量相对较低,保护能够正常动作。

2.3 换流变阀侧区外转区内故障

换流变阀侧发生转换性故障,即故障由区外转移至区内。在发生区外故障且产生故障性涌流后,差动电流呈现故障性涌流特征;当故障由区外转移至区内时,此时的差动电流为区内故障电流叠加故障性涌流,由于故障性涌流幅值较大且含有大量的二次谐波,差动保护误闭锁,导致差动保护延时动作甚至拒动。

图 7 为上述阀侧区外转区内故障过程中网侧电流和差动电流波形图。

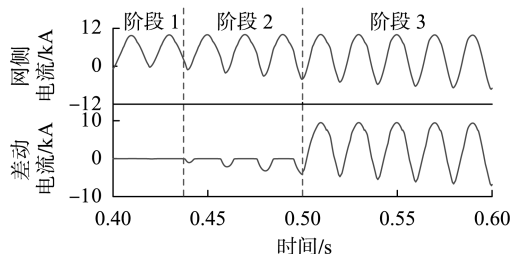


图 7 不同阶段网侧电流和差动电流波形图

Fig.7 Waveform of currents at grid side and differential current at different stages

a. 阶段 1 为区外故障发生但未出现故障性涌流的时间段,由于此阶段故障性涌流还未出现,因此网侧电流完全位于时间轴上方,差动电流为 0。

b. 阶段 2 为故障性涌流产生后至故障发生转移之前的时间段,随着故障性涌流的产生及发展,网侧电流逐渐向下偏移,波形直流分量减小但仍然为正值,差动电流则呈现出故障性涌流特征,方向与网侧电流相反,直流分量为负值,且幅值逐渐反向增大。

c. 阶段 3 为故障由区外转移至区内后的时间段,此阶段网侧电流波形继续向下偏移直至波形呈现正负半波对称,直流分量减小至 0,另外,此时差动电流由网侧电流和阀侧电流共同决定,差流波形偏向时间轴上方,直流分量则出现由负到正的转变。

3 种不同阶段下网侧电流和差动电流的直流分量特征如表 1 所示。表中,“+”表示波形直流分量为正;“-”表示波形直流分量为负;“+/-”表示波形直流分量近似为 0;“0”表示波形幅值较小;规定换流变两侧的电流以流入换流变为正方向。

表 1 不同阶段下网侧电流和差动电流直流分量特征

Table 1 DC component characteristics of currents at grid side and differential current at different stages

阶段	直流分量特征	
	网侧电流	差动电流
1	+	0
2	+	-
3	+/-	+

3 仿真实验

3.1 HVDC 系统仿真模型

利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件,根据 ± 800 kV 特高压直流输电工程的相关实际参数,建立了包含交流系统、换流变、换流阀、交流滤波器、直流滤波器、平波电抗器、输电线路以及相关直流控制在内的 HVDC 系统仿真模型。直流电压为 ± 800 kV,额定电流为 3.125 kA,额定容量为 $2 \times 2\ 500$ MW。

本文以单极大地回路运行方式进行相应的仿真分析,系统模型如图 8 所示。换流站内有 2 组换流变运行,高压端为 1 组 Y0/Y 和 Y0/ Δ 接线换流变、低压端为 1 组 Y0/Y 和 Y0/ Δ 接线换流变,每组中 Y0/Y 和 Y0/ Δ 换流变额定容量均为 750.63 MV·A,额定电压均为 $U_{1N}/U_{2N} = 525$ kV/169.85 kV。

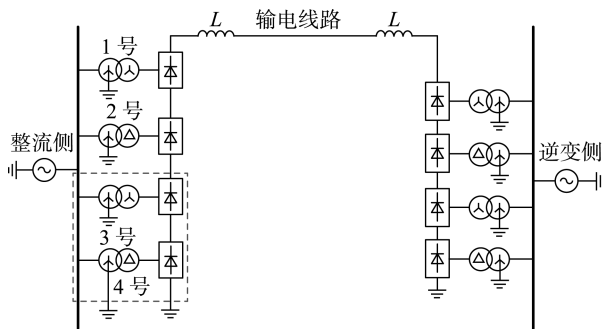


图 8 单极大地运行方式的系统模型

Fig.8 Simulation model of mono-polar operation

3.2 换流变阀侧区外单相故障

与 1.1 节理论分析相对应,以图 8 中 3 号和 4 号换流变为 12 脉动换流变基本单元(如图 8 中虚线框所示),并在 3 号 Y0/Y 换流变阀侧引入故障模块进行分析,仿真时长为 1 s。将换流变网侧、阀侧电流均折算到网侧,计算得到差动电流,进而对差动电流中的二次谐波与基波分量百分比进行分析。设定二次谐波制动门槛为 15%。

利用搭建的仿真模型,对 3 号换流变 A 相进行区外单相金属性接地故障仿真,故障时刻为 0.4 s,

故障相差动电流波形及其二次谐波百分比如图9所示。

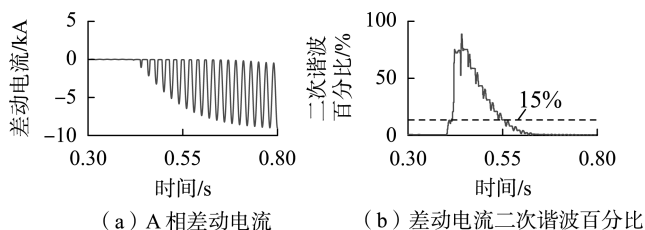


图9 换流变阀侧区外单相金属性接地短路波形图

Fig.9 Waveforms of external single-phase grounding fault on valve side of converter transformer

正常情况下,发生区外故障时的差动电流取决于励磁电流。通过图9(a)与图6对比可得,差动电流呈现故障性涌流特征,初始阶段的差动电流较小,随着故障性涌流的产生,差动电流逐渐增大。由图9(b)可得,发生区外故障后,由于故障性涌流的二次谐波含量较大,差动保护能够可靠闭锁。此外,随着换流变铁芯饱和程度加深,差动电流的间断角逐渐减小,差动电流二次谐波分量也逐渐减小。

3.3 换流变阀侧区内单相故障

利用搭建的仿真模型,对3号换流变进行A相区内单相金属性接地故障仿真,故障时刻为0.4 s,故障相差动电流波形及其二次谐波百分比如图10所示。

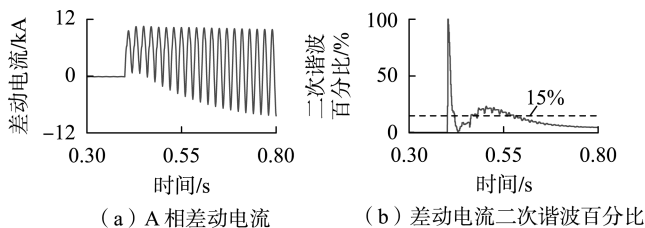


图10 换流变阀侧区内单相金属性接地短路波形图

Fig.10 Waveforms of internal single-phase grounding fault on valve side of converter transformer

由图10(a)可见,发生区内故障后,由于故障性涌流初始阶段的幅值较小,差动电流幅值主要取决于区内故障电流,波形完全偏于时间轴一侧,而随着故障性涌流的产生及发展,差动电流波形则逐渐呈对称趋势,与2.2节理论分析结果一致。由图10(b)可以看出,在故障发生后,由于故障性涌流仍处于发展阶段,差动电流受故障性涌流影响较小,二次谐波含量较小,并未超过二次谐波制动门槛,保护能够正常动作。

3.4 换流变阀侧区外转区内单相故障

利用搭建的仿真模型,对3号变压器进行阀侧区外A相接地故障转区内A相接地故障仿真,区外故障时刻为0.4 s,区外转区内故障时刻为0.5 s,故障相差动电流波形及其二次谐波百分比如图11所示。

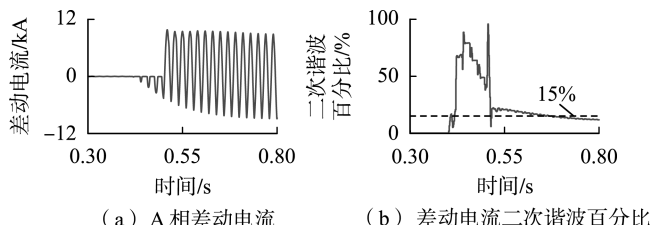


图11 换流变阀侧区外转区内单相金属性接地故障波形图

Fig.11 Waveforms of transferring fault on valve side of converter transformer

从图11(a)可以看出,区外故障发生后,但转换为区内故障前,差动电流呈现故障性涌流特征,且故障性涌流逐渐增大,因此当故障由区外转移到区内时,由于故障性涌流幅值已达较大值,此时差动波形已呈现向下偏移趋势,直流分量相对较小。从图11(b)可以看出,在区外故障发生后,初始阶段的差动电流较小,随着故障性涌流的产生,差动电流逐渐增大,但由于故障性涌流的二次谐波含量较大,差动保护能够可靠闭锁,不会误动。然而,当故障由区外转移至区内时,此时的差动电流为区内故障电流叠加故障性涌流,由于故障性涌流幅值较大且含有大量的二次谐波,差动保护将延时动作,与2.3节的理论分析结果一致。因此在换流变阀侧发生单相区外转区内接地故障的情况下,由区外故障引起的故障性涌流容易造成区外故障转换为区内故障后差动电流二次谐波含量较大,进而导致换流变差动保护误闭锁。

此外,本文进一步分析了在区外单相接地故障持续不同时间后转移至区内故障的情况下,换流变差动保护相应的动作情况,得到的仿真结果如表2所示,表中, P_{2nd} 为区外转区内故障发生后20 ms的差动电流二次谐波百分比;“√”表示保护正确动作;“×”表示保护误闭锁。

表2 不同持续时间下差动保护动作情况

Table 2 Operation results of differential protection under different durations

持续时间/s	$P_{2nd}/\%$	保护动作情况
0.02	11.78	√
0.04	14.12	√
0.06	16.78	×
0.08	18.91	×
0.10	21.15	×

由表2可知,当区外故障转移至区内故障的时间间隔在2个工频周期以内时,由区外故障引起的故障性涌流仍处于发展阶段,二次谐波含量较小,因此在发生转换性故障后,差动电流二次谐波含量较小,未超过二次谐波制动门槛(15%),差动保护能够正常动作;而当区外故障与区内故障的时间间隔超过2个工频周期甚至更长时,随着故障性涌流的发

展,区外故障转移至区内故障后差动电流二次谐波百分比超出二次谐波制动门槛,导致换流变差动保护误闭锁。

4 差动保护误闭锁的解决方案

前述研究表明:当换流变阀侧发生区外转区内单相接地故障时,换流阀的单向导通性使得换流变产生故障性涌流,差动电流的二次谐波含量增大,进而可能引起换流变差动保护误闭锁。

根据 2.3 节的分析可知,区外故障发生后,但转换为区内故障前,差动电流为故障性涌流,由于故障性涌流方向与网侧电流方向相反,因此差动电流的方向与换流变网侧电流相反,即差动电流位于时间轴下方,此时差动电流的直流分量为负值;当故障由区外转到区内时,此时差动电流由网侧电流和阀侧电流共同决定,差动电流波形偏向时间轴上方,差动电流直流分量为正值并一直保持。据此,本文利用转换性故障发生后差动电流直流分量出现“由负变正”极性反转的特征,在二次谐波制动原理的基础上,提出适用于换流变阀侧区外转区内故障的改进差动保护,其流程如图 12 所示。

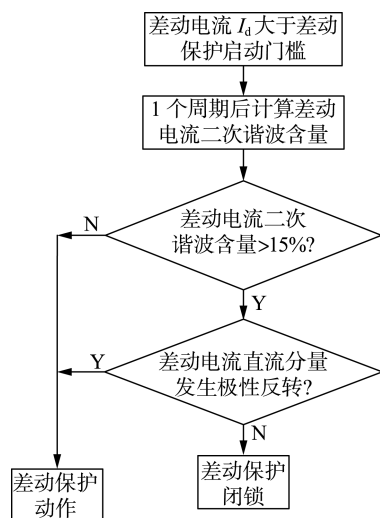


图 12 修正后的差动保护闭锁方案流程图

Fig.12 Flowchart of locking scheme for modified differential protection

图中,差动电流 I_d 为:

$$I_d = |I_{d1} + I_{d2}| \quad (7)$$

其中, I_{d1} 与 I_{d2} 分别为换流变网侧和阀侧电流。

以 A 相差动保护为例,一旦检测到 A 相差动电流 I_{dA} 大于差动保护的启动门槛,则在 1 个周期后计算差动电流二次谐波含量,若二次谐波含量并未超过 15%,则判定为区内故障,保护动作;否则判断在故障后这一周期内差动电流的直流分量是否发生极性反转,若发生由负到正的极性反转,则判定为区内故障,保护动作;否则保护闭锁。

5 结论

本文基于 PSCAD 仿真及理论分析,提出了特高压换流变阀侧单相故障时故障性涌流的产生机理和变化特点,同时指出故障性涌流在换流变在区外转区内故障情况下引起差动保护闭锁的原因:发生区外故障后,由换流变单向导通性引起的短路电流半周不对称导致换流变铁芯半周饱和,继而产生故障性涌流并逐渐发展,当故障由区外转移至区内时,逐渐增大的谐波含量则会使差动电流二次谐波百分比超出二次谐波制动门槛,导致差动保护闭锁。针对上述现象,本文利用转换性故障发生后差动电流直流分量出现“从负到正”极性反转这一特征,在二次谐波制动原理的基础上,对差动保护闭锁方案进行改进,能够有效识别因故障性涌流造成的保护误闭锁,确保差动保护的可靠性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 郑晓冬, 邵能灵, 杨光亮, 等. 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 10-14.
ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, YANG Guangliang, et al. Modeling and simulation of UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 10-14.
- [2] 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.
- [3] 申洪明, 宋璇坤, 黄少锋, 等. 换相失败对 TA 传变特性及换流变差动保护的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 218-223.
SHEN Hongming, SONG Xuankun, HUANG Shaofeng, et al. Effect of commutation failure on transfer characteristics of CT and differential protection of converter transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 218-223.
- [4] 乔晓敏. 直流系统换流变压器差动保护的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
QIAO Xiaomin. The research on differential protection of the converter transformer in DC system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [5] 邹晓峰. 变压器与换流变压器保护相关问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
ZOU Xiaofeng. Research on problems in protection of power transformer and converter transformer[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [6] 高爱云, 聂娟红, 李晓华, 等. 换流变压器阀侧单相接地故障保护动作分析[J]. 电工电能新技术, 2010, 29(4): 71-75.
GAO Aiyun, NIE Juanhong, LI Xiaohua, et al. Protection analysis of single-phase ground fault at converter transformer valve side[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2010, 29(4): 71-75.
- [7] 罗海云, 余江, 欧开建. 换流变压器阀侧接地故障特性分析[J]. 中国电力, 2009, 42(6): 84-87.
LUO Haiyun, YU Jiang, OU Kaijian. Grounding fault analysis at con-

- verter transformer valve side[J]. Electric Power, 2009, 42(6): 84-87.
- [8] 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, 26(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, 26(6): 38-45.
- [9] 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.
- [10] 黄俊伸,张晓红,吕英飞,等. HVDC换流器故障分析与仿真研究[J]. 黑龙江电力, 2013, 35(5): 412-416.
- HUANG Junshen, ZHANG Xiaohong, LÜ Yingfei, et al. Fault analysis and simulation study of HVDC converter[J]. Heilongjiang Electric Power, 2013, 35(5): 412-416.
- [11] 肖燕彩,文继锋,袁源,等. 超高压直流系统中的换流变压器保护[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 91-94.
- XIAO Yancai, WEN Jifeng, YUAN Yuan, et al. Protection of converter transformer in HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 91-94.
- [12] 鲁俊生. 交直流深度耦合下变压器差动类保护动作性能分析及新原理研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2016.
- LU Junsheng. Operation performance analysis and novel principles studies on differential-type protection of power transformer under AC-DC deeply coupling interactions[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [13] 宋彬霖,程玲. 特高压直流一次设备运行可靠性分析[J]. 电气技术, 2015(6): 110-118.
- SONG Zilin, CHENG Ling. Operation reliability analysis of primary equipment in UHVDC[J]. Electrical Engineering, 2015(6): 110-118.
- [14] 韩昆仑. 高压直流输电系统换流器与线路保护动态特性分析与整定研究[D]. 广州:华南理工大学, 2013.
- HAN Kunlun. Research on dynamic characteristic and protection setting of HVDC converter and line protection[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [15] 郑涛,王增平. 超/特高压变压器差动保护关键技术与新原理[M]. 北京:科学出版社, 2017: 98-104.

作者简介:



郑涛

郑涛(1975—),男,北京人,教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: zhengtao@ncepu.edu.cn);

胡鑫(1994—),男,浙江衢州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: huxin0996@163.com)。

Fault inrush current mechanism of UHV converter transformer and its impacts on differential protection

ZHENG Tao, HU Xin

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The inrush current caused by the unidirectional conductivity of the converter valve when the single-phase grounding fault occurs on the valve side of the UHV converter transformer is defined as fault inrush current, whose mechanism and variation characteristics are analyzed from the aspect of the flux variation. Taking a converter transformer in UHVDC transmission system as an example, the influence of fault inrush current on the operation characteristics of differential protection is analyzed. The results show that the fault inrush current easily causes differential protection of converter transformer to be locked improperly when external fault transfers to internal fault on valve side. Aiming at this problem, further analysis shows that the unidirectional conductivity of the converter valve causes the DC component of the differential current to be reversed from negative to positive polarity after the occurrence of the transferring fault, based on which, the improved logic criterion of lock logic is proposed for the differential protection of converter transformer. The simulative results verify the reliability of the proposed criterion.

Key words: UHV power transmission; converter transformer; fault inrush current; differential current; differential protection

附录

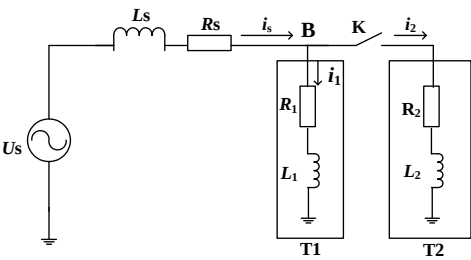


图 A1 并联运行变压器产生和应涌流的等效电路图

Fig.A1 Equivalent circuit diagram of transformer sympathetic inrush current under parallel operation