

换相失败对 TA 传变特性及换流变差动保护的影响分析

申洪明¹, 宋璇坤¹, 黄少锋², 刘颖¹, 肖智宏¹, 韩柳¹, 陈炜¹, 张祥龙¹

(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209;

2. 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:详细研究了换相失败对电流互感器传变特性的影响机理, 分析指出换相失败期间注入交流系统中大量的直流分量可能导致电流互感器暂态饱和。从理论上分析了换相失败造成直流分量过大的原因。然后综合分析了在电流互感器、换流变压器同时饱和时换相失败对换流变压器差动保护的影响, 结果表明换流变压器发生内部故障时差动保护可能拒动, 但发生外部故障时保护一般能可靠闭锁。最后从继电保护和换流器拓扑结构层面提出了相应的解决措施。

关键词:高压直流输电; 换相失败; 电流互感器; 换流变压器; 差动保护; 继电保护

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.6081/j.issn.1006-6047.2018.04.032

0 引言

近年来, 大量电力电子器件的使用推动了我国电网的快速发展, 也形成了新的电网传输模式——高压直流输电 (HVDC)。高压直流输电由于其独特的输电优势, 在我国得到了迅速发展^[1]。但直流系统自身的故障, 如换相失败或闭锁会对交流系统的稳定运行产生重大冲击, 严重影响了交流系统安全稳定运行^[2], 为此需要分析直流故障对交流侧安全稳定的影响。

电流互感器 (TA) 的主要作用是将系统一次侧的电流转换成较小的二次侧电流, 为电力系统的保护与控制提供电流信息。因此 TA 的正确传变是电力系统保护与控制确保系统稳定运行的关键。当 TA 发生饱和时, TA 的二次侧电流已经发生畸变, 不能正确反映系统一次侧的信息, 可能会造成电力系统保护的不正确动作^[3]。

文献[4]提出了一种快速整组复归时间方案, 以解决利用时差法判别 TA 饱和可能造成的差动保护误动; 文献[5]提出了一种利用工频量差动速断保护解决负荷变压器低压侧故障引起 TA 深度饱和导致差动保护误动问题的措施; 文献[6]分析了当线路两侧 TA 传变特性不一致时对线路电流差动保护的影响; 文献[7-9]详细研究了太阳磁暴引起直流偏磁, 进而导致 TA 局部暂态饱和及深度饱和时变压器差动保护受到的影响。上述文献研究表明 TA 饱和会对电流差动保护产生不利影响。文献[10]首次研究了换相失败对换流变压器 (下文简称换流变) 差动保护的影响, 并且提出了基于皮尔逊相关系数的综合制动方案。但文中假定 TA 能正常传变, 只考虑换相失败引发换流变饱和对差动保护的影响。

本文在文献[10]的基础上进一步拓展和加深

研究。首先对换相失败对 TA 传变特性的影响进行分析, 揭示了换相失败对 TA 传变特性的影响机理, 指出换相失败期间大量的直流分量可能导致 TA 暂态饱和; 然后研究了同时考虑换流变以及 TA 饱和时换流变差动保护的動作性能, 分析表明虽然发生外部故障时换流变差动保护一般不误动, 但发生内部故障时可能会拒动; 最后提出了优化 2 次谐波制动逻辑、使用基于电容换相换流器的高压直流输电等换流器拓扑结构等解决措施。

1 TA 传变特性

电力系统中一般需要 TA 传变一次侧电流, 为系统的保护与控制提供测量信号。TA 的等值模型如图 1 所示。图中, Z_1 、 Z_2 分别为 TA 的一、二次侧阻抗; Z_m 为励磁阻抗; Z_L 为负荷阻抗; i_1 、 i_2 、 i_u 分别为 TA 一次侧、二次侧、励磁支路的电流。

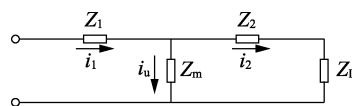


图 1 TA 等值模型

Fig.1 Equivalent model of CT

当 TA 正常传变时, 其励磁阻抗 Z_m 很大, 则 $i_1 \approx i_2$, 即 TA 二次侧能正确传变一次侧的电流。但如果 TA 发生饱和, 随着饱和程度的加深, Z_m 数值变小, 励磁电流 i_u 随之增大, 此时存在 $i_1 = i_u + i_2$, 因此 i_2 不再与 i_1 相同, 表明 TA 不能正确传变一次侧电流。

典型的 TA 励磁特性如图 2 所示。图 2 中主要包括 I 段和 II 段 2 个线段, 其中, I 段为线性段, II 段为饱和段, I 段的斜率远大于 II 段的斜率。事实上, 当 TA 进入饱和时, 其饱和程度不断变化, 因此 II 段是由多个斜率不等的线段组成的, 如图 2 所示, 但由于斜率差别不大, 因此可以近似用某个斜率来表示 TA 的饱和区。需要指出的是, 如果 TA 运行在虚线圈内, 则表明此时 TA 处于局部饱和状态。

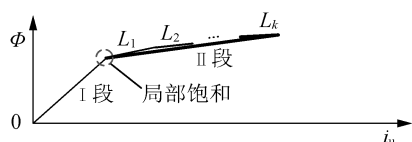


图2 TA励磁曲线

Fig.2 Excitation curve of TA

2 换相失败对TA传变特性的影响机理分析

通过第1节的分析可以看出,当TA在非饱和区运行时,其二次侧电流能正确传变一次侧电流的特征;但运行在饱和区时,二次侧电流会失真,进而对电力系统的保护与控制产生影响。造成TA饱和的原因主要分为稳态饱和、暂态饱和^[11-13]2类。其中稳态饱和是由于一次侧电流过大造成的,一般一次侧电流要达到10倍左右的额定电流^[11],因此发生稳态饱和的概率较小;暂态饱和是由于非周期分量造成的,发生的概率相对较大。

2013年5月,天广直流发生了一起由A相接地故障引发的直流换相失败故障。图3给出了Y/△形接线换流变三相差动电流波形图。通过图3可以看出,换相失败期间三相差动电流都偏于一侧。造成差动电流偏移的原因可能是换流变饱和,也可能是TA饱和影响了其正常的传变特性。关于换相失败对换流变饱和的影响,文献[10]已经进行了详细的分析,在此不再赘述,下文重点分析换相失败对TA传变特性的影响。

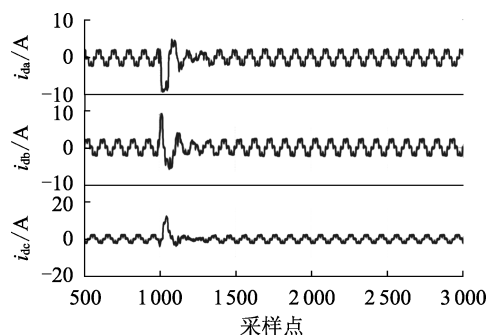


图3 换流变三相差动电流波形

Fig.3 Three-phase differential current waveforms of converter transformer

2.1 换相失败诱发直流分量的机理分析

交流系统故障、触发回路故障等都会造成换相失败。现场统计表明,交流系统故障是引发换相失败的主要原因,2006年天广直流发生的7次换相失败均由交流系统故障导致,因此本文重点分析由交流系统故障导致的换相失败对TA传变特性的影响。表1列出了基于CIGRE HVDC标准测试模型中B相在0.35s发生故障时换流变(Y/△形接线)阀侧B相电流直流分量、基波的有效值,该故障在0.354s引发了换相失败故障。通过表1可以看出,换相失败期间流经换流变的直流分量与基波分量之

比分别为4.201、1.922及1.381,直流分量的比例极高,因此换相失败极易诱发TA的暂态饱和。

表1 换流变电流谐波成分

Table 1 Harmonic contents of converter transformer

t/s	直流分量 有效值/kA	基波分量 有效值/kA	直流分量与 基波之比
0.354	3.277	0.780	4.201
0.356	2.662	1.385	1.922
0.364	2.309	1.672	1.381

图4给出了交直流系统中流入换流变阀侧的三相电流波形图,其中灰色区域表示附录中图A1中阀 $V_1 \rightarrow V_3$ 换相失败期间的三相电流波形,白色区域表示恢复正常换相时的三相电流波形,数字1—6为各阀编号。通过图4可以看出,正常运行时,三相电流波形正负半波相加为0,即不存在直流分量;换相失败期间,三相电流波形完全偏于一侧,此时利用傅里叶算法计算得到的直流分量显然较大。因此,换相失败会导致流入交流系统中的直流分量显著增大。

换相过程
1→1 1→1 1→1 1→3 3→5 5→1
导通管编号 1,2 2,1 1,4 4,1 1,6 6,1 1,2 2,3 3,4 4,5 5,6 6,1

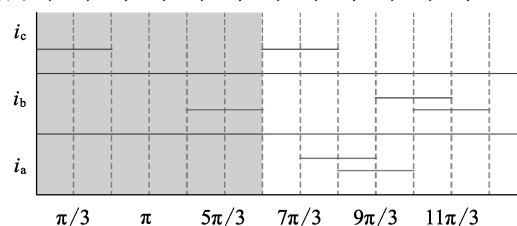


图4 换相失败时流入换流变阀侧的电流示意图

Fig.4 Schematic diagram of currents flowing into valve side of converter transformer during commutation failure

2.2 换相失败对TA传变特性的影响分析

基于CIGRE HVDC标准测试模型,以Y/△形接线换流变为例,图5给出了其TA布置图,图中F为换流变外部故障点, F_1 为内部故障点,TA₁、TA₂分别为换流变阀侧和网侧TA。

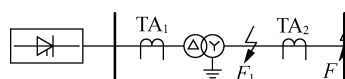


图5 换流变TA布置图

Fig.5 Location of TA for converter transformer

为了更加直观地说明换相失败对TA传变特性的影响,本文分别利用TA两侧电流幅值、相角的传变误差来表征TA的传变特性,如式(1)所示。为了便于分析,假定TA₁、TA₂的变比为1:1。

$$\begin{cases} \Delta m = m_2 - m_1 \\ \Delta p = p_2 - p_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, m_1 、 m_2 分别为TA一次侧与二次侧电流幅值; p_1 、 p_2 分别为TA一次侧与二次侧电流的相角。

图6给出了0.5s时点F处发生A相接地故障

引发换相失败情况下,TA 幅值以及相角传变误差曲线,其中图 6(a)为 TA 幅值传变误差,图 6(b)为 TA 相角传变误差。通过图 6 可以看出,TA₁的幅值和相角的传变都出现了较大误差,TA₁已经不能正确传变其一次侧电流。

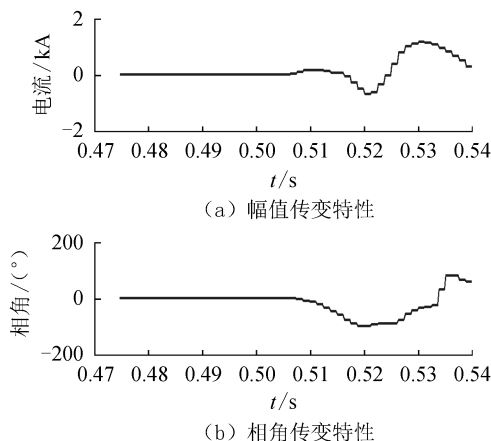


图 6 TA₁传变特性误差曲线

Fig.6 Transfer error curve of TA₁

图 7 给出了相同情况下 TA₂的幅值、相角传变误差曲线。通过图 7 可以看出,TA₂的幅值和相角同样出现了较大的传变误差,但传变误差的具体数值与 TA₁不尽相同。

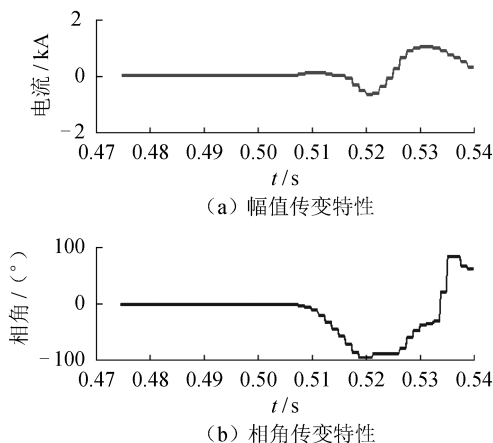


图 7 TA₂传变特性误差曲线

Fig.7 Transfer error curve of TA₂

显然,相对换相失败对换流变两侧 TA 传变特性影响不同的情况,如果换相失败对换流变两侧 TA 的传变特性影响一致,比如幅值、相角同时增大或减小相同数值时,在不考虑其他因素影响的情况下,换相失败对差动保护的影响不大,即发生外部故障时,动作电流仍然为 0;发生内部故障时,制动电流为 0。

为了进一步验证换相失败对 TA 传变特性的影响程度,利用 J-A 模型来表示 TA₁的饱和程度。J-A 模型可以较好地描述磁化曲线,其以磁畴理论为基

础,将铁磁物质看作是由多个小磁畴构成,通过考虑畴壁移动、能量平衡原理来描述磁化强度 M 与磁场强度 H 关系的模型。利用 J-A 模型得到的是 $M-H$ 曲线,通过转换可以得到磁通密度 B 与磁化强度 H 关系曲线,即 $B-H$ 磁滞回线。通过磁滞回线波形可以模拟铁磁材料的饱和情况^[14]。

图 8 给出了与图 7 相同故障下 TA₁的 $H-B$ 曲线。通过图 8 可以看出,此时 $H-B$ 曲线有较长的拖尾现象,表明 TA₁发生了饱和现象。

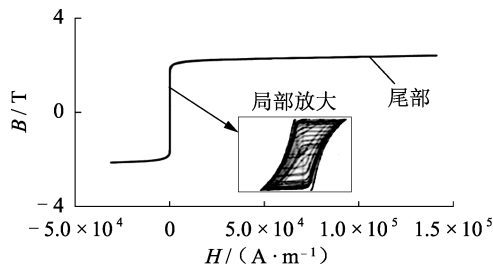


图 8 TA₁的 $H-B$ 曲线

Fig.8 Curve of H vs. B for TA₁

通过上文分析可以看出,换相失败对 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,并且由于换流变饱和导致流经换流变两侧 TA 的直流分量不再相同,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,势必会对换流变差动保护产生不利影响。

3 考虑 TA 饱和时换相失败对换流变差动保护的影响分析及对策

3.1 考虑 TA、换流变同时饱和时换相失败对差动保护的影响

通过上文的分析可以看出,换相失败会造成 TA 饱和,甚至深度饱和,而 TA 饱和本身就会对电流差动保护产生不利影响^[6-9]。同时由文献[10]可知,换相失败也会造成换流变饱和。但无论是 TA 饱和,还是换流变饱和,都会产生较多的 2 次谐波分量,显然会对配有 2 次谐波制动方案的变压器差动保护产生影响。因此需要综合考虑 TA 和换流变都发生饱和的情况对换流变差动保护的影响。但对于双元件饱和对继电保护的影响,现阶段尚没有很好的定量分析方法,主要是利用仿真分析手段来分析解决问题。

图 9 给出了图 5 中点 F_1 发生故障时故障相差动电流及其 2 次谐波比 k 。由图 9(a)可以看出,故障相差动电流在故障期间显著增大,但 2 次谐波比 k 远大于一般的整定值 15%~20%,因此带有 2 次谐波制动环节的差动保护拒动。需要指出的是,附录中图 A2 给出了此时逆变器熄弧角和换流变励磁电流曲线,通过图 A2 可以看出,此时换相失败引起了换流变饱和。

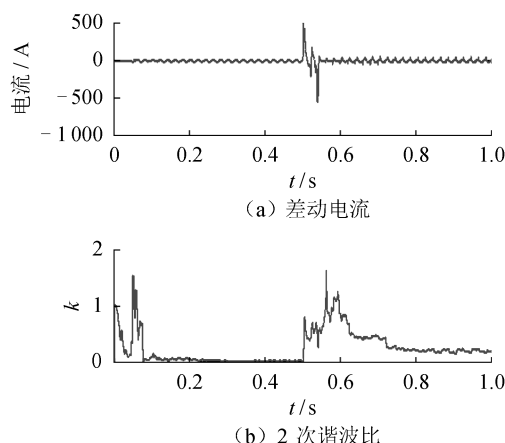


图9 发生内部故障时差动电流及2次谐波比曲线

Fig.9 Differential current and its 2nd-order harmonic ratio under internal fault

图10给出了在点F发生故障时故障相差动电流及其2次谐波比。图10(a)是利用TA一次侧电流计算的差动电流,图10(b)是利用TA二次侧电流计算的差动电流。故障期间由于换流变饱和,理论上差动电流应增大,但通过图10(a)可以看出,差动电流增大后立即减小,主要因为直流控制造成了流入换流变的电流幅值减小。通过图10(a)、(b)对比可以看出,一、二次侧差动电流在故障后不再存在严格的比例关系,这是由于换流变两侧TA饱和且饱和度不一致造成的(如图6、7所示)。同时,由图10(c)可以看出,此时差动电流的2次谐波比远大于一般的整定值,因此差动保护闭锁,可靠不动作。附录中图A3给出了此时逆变器熄弧角和换流变励磁电

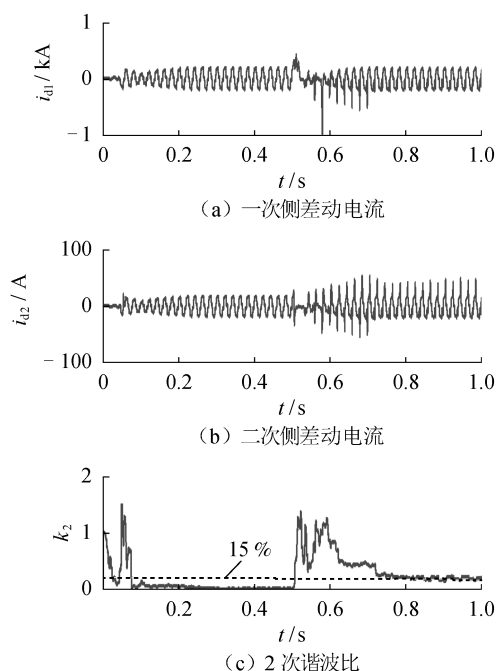


图10 发生外部故障时差动电流及2次谐波比曲线

Fig.10 Differential current and its 2nd-order harmonic ratio under external fault

流曲线,通过中图A3可以看出,此时故障引发了换相失败,并且换相失败引起了换流变饱和。

3.2 解决措施的探讨

TA饱和或者传变特性不一致时会对差动保护产生不利影响,相关学者已经做了较多研究并给出了适用于现场应用的解决措施^[15]。因此,下文重点研究复杂工况下避免差动保护不正确动作的解决措施。

3.2.1 基于继电保护视角的解决方案

现有的带2次谐波制动的差动保护动作逻辑如图11所示,即发生内部故障时条件1和2同时满足时保护出口动作。由上文分析可知,由于TA或换流变饱和,条件2不满足,所以变压器在发生内部故障时保护可能拒动。进一步地,对比图9(a)、图10(b)可以看出,内部故障时差动电流幅值显著增大;但发生外部故障时,当TA与换流变同时饱和且直流控制作用时,差动电流幅值 I_d 不升反降,因此不会达到动作门槛值 I_{dz} ;但发生内部故障时由于差动电流包含了短路电流,因此幅值显著增大。为此可仅通过图11中的条件1,即差动电流保护本身就可以保证TA、换流变同时饱和时区分变压器内、外部故障。



图11 变压器差动保护动作逻辑框图

Fig.11 Operating logic of differential protection for transformer

为了解决发生内部故障时条件2可能不满足的问题,可以采用如下解决方案:

a. 若检测到图3中TA₁与TA₂至少有1个发生饱和,则将条件2闭锁,仅依赖条件1保证发生内部故障时保护出口动作;

b. 若检测到图5中TA₁与TA₂都能正常传变,此时仅存在变压器饱和的影响,则可采用文献[10]提出的利用变压器两侧基波电流幅值变化趋势的方法;

c. 变压器空充时,同时保留条件1与2,避免涌流的影响。

3.2.2 其他解决措施的探讨

针对TA、换流变同时饱和对差动保护的影响,除了从继电保护角度给出解决措施外,也可从换流器拓扑结构层面给出对策。

换相失败期间注入的大量直流分量是换相失败对TA传变特性及换流变差动保护产生影响的根源。采用新的换流器拓扑结构,如CCC-HVDC,如图12所示,在逆变器与换流变之间插入电容 C ^[16],利用电容 C “通交阻直”的特性来消除直流分量对TA和换流变差动保护的影响。采用CCC-HVDC可以

有效阻止直流分量流过 TA 及换流变,从根本上解决了 TA 与换流变饱和的问题。

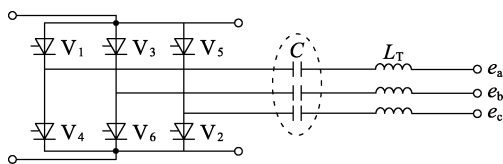


图 12 CCC-HVDC 拓扑结构示意图

Fig.12 Topology of CCC-HVDC

4 结论

本文详细分析了交流故障引发的换相失败对 TA 传变特性的影响,进而综合考虑了 TA 以及换流变都发生饱和时换相失败对换流变差动保护的影响,主要结论如下:

a. 交流系统故障引起换相失败期间注入交流系统的大量直流分量是影响 TA 的传变特性的主要因素,可能造成 TA 饱和,而且对换流变两侧 TA 的影响程度不同;

b. 同时考虑 TA、换流变饱和时,换相失败对换流变差动保护的影响较为复杂,如换流变发生内部故障时差动保护可能拒动,发生外部故障时保护不误动;

c. 通过对变压器差动保护逻辑的优化、采用 CCC-HVDC 拓扑结构等措施在一定程度上可以降低或者消除换相失败对换流变差动保护的影响。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 浙江大学发电机教研组. 直流输电[M]. 北京:水利电力出版社,1985:23-24.
- [2] 赵腾,张焰,叶冠豪,等. 多回特高压直流分层馈入模式下交直流混联系统的稳态特性分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):157-164.
ZHAO Teng,ZHANG Yan,YE Guanhao,et al. Steady-state characteristics analysis for AC-DC hybrid system in hierarchical-feed mode of multi-loop UHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(8):157-164.
- [3] 毕大强,冯存亮,葛宝明. 电流互感器局部暂态饱和识别的研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):184-190.
BI Daqiang,FENG Cunliang,GE Baoming. Research on identification of partial transient saturation in current transformer[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(31):184-190.
- [4] 郝后堂,史泽兵,江卫良. 重合于故障时 TA 饱和对差动保护的影响及对策[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):167-170.
HAO Houtang,SHI Zebing,JIANG Weiliang. Influence of CT saturation on differential protection during faulty line reclose and countermeasure[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):167-170.
- [5] 周昊程,陆广香,周建新,等. 负荷变压器差动速断保护区外故障误动原因分析及对策[J]. 电力系统自动化,2014,38(14):122-125.
ZHOU Haocheng,LU Guangxiang,ZHOU Jianxin,et al. Analysis and countermeasures of external fault maloperation for load transformer differential current instantaneous protection[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(14):122-125.
- [6] 李旭,黄继东,倪传坤,等. 不同电流互感器对线路差动保护的影响及对策研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(3):141-145.
LI Xu,HUANG Jidong,NI Chuankun,et al. Influence of mixing different types of current transformers on line differential protection and the countermeasures[J]. Power System Protection and Control,2014,42(3):141-145.
- [7] 郑涛,陈佩璐,刘连光,等. 计及直流偏磁的电流互感器传变特性对差动保护的影响[J]. 电力系统自动化,2012,36(20):89-93.
ZHENG Tao,CHEN Peilu,LIU Lianguang,et al. Transferring characteristics of current transformer affected by DC magnetic bias and its impact on differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(20):89-93.
- [8] 郑涛,陈佩璐,刘连光,等. 地磁感应电流对电流互感器传变特性及差动保护的影响[J]. 电力系统自动化,2013,37(22):84-89.
ZHENG Tao,CHEN Peilu,LIU Lianguang,et al. Effects of geomagnetically induced current on transferring characteristics of current transformer and transformer differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(22):84-89.
- [9] 郑涛,陈佩璐,毛安澜,等. 地磁感应电流作用下的 CT 饱和特性及其引起的变压器差动保护误动[J]. 电网技术,2014,38(2):520-525.
ZHENG Tao,CHEN Peilu,MAO Anlan,et al. Research on CT saturation characteristics affected by geomagnetically induced current and resulting malfunction of transformer differential protection[J]. Power System Technology,2014,38(2):520-525.
- [10] 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.
- [11] 袁季修,盛和乐,吴聚业,等. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京:中国电力出版社,2004:58-73.
- [12] 黄婷,郑涛,陆格野,等. 变压器差动保护的 P 级电流互感器“同型”匹配方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):213-222.
HUANG Ting,ZHENG Tao,LU Geye,et al. Type-matching of P-class CTs for differential protection of power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(7):213-222.
- [13] 郑涛,马玉龙,黄婷,等. 保护用电流互感器铁芯剩磁衰减规律分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):126-131.
ZHENG Tao,MA Yulong,HUANG Ting,et al. Attenuation law analysis of core residual magnetism for protective current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(10):126-131.
- [14] 白保东,赵晓旋,陈德志,等. 基于 J-A 模型对直流偏磁条件下变压器励磁电流的模拟及实验研究[J]. 电工技术学报,2013,28(2):162-166.
BAI Baodong,ZHAO Xiaoxuan,CHEN Dezhi,et al. Simulation and

experiment research on transformer excitation current under DC magnetic bias based on J-A model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 162-166.

[15] 黄少锋. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 162-165.

[16] 汤广福, 贺之渊, 曹均正, 等. 2013年国际大电网会议系列报道——高压直流输电和电力电子技术最新进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(24): 1-4.

TANG Guangfu, HE Zhiyuan, CAO Junzheng, et al. A review of CIGRE' 2012 on HVDC transmission and power electronic technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24): 1-4.

作者简介:



申洪明

申洪明(1988—), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: shen198806@126.com);

宋璇坤(1959—), 女, 北京人, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统保护与控制;

黄少锋(1958—), 男, 福建福州人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统保护与控制。

Effect of commutation failure on transfer characteristics of CT and differential protection of converter transformer

SHEN Hongming¹, SONG Xuankun¹, HUANG Shaofeng², LIU Ying¹, XIAO Zhihong¹,
HAN Liu¹, CHEN Wei¹, ZHANG Xianglong¹

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

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

Abstract: The effect of commutation failure on transfer characteristics of CT (Current Transformer) is analyzed, which shows that plenty of DC components during the commutation failure may lead the CT saturation. Then the reason why the commutation failure brings plenty of DC components is theoretically analyzed. The effect of commutation failure on differential protection of converter transformer during the simultaneous saturation of CT and converter transformer is analyzed, and the results show that the differential protection of converter transformer may refuse to operation when internal fault occurs, while be reliably blocked when external fault occurs. Some countermeasures are proposed from aspects of relay protection and converter topologies.

Key words: HVDC power transmission; commutation failure; electric current transformers; converter transformer; differential protection; relay protection

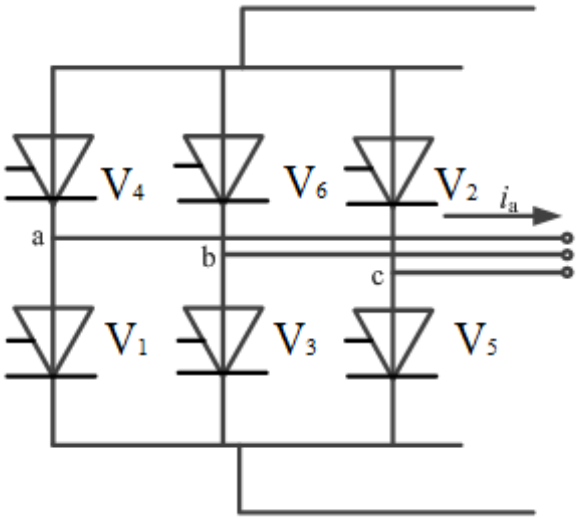


图 A1 换流桥接线图

Fig.A1 Connection diagram of inverter bridge

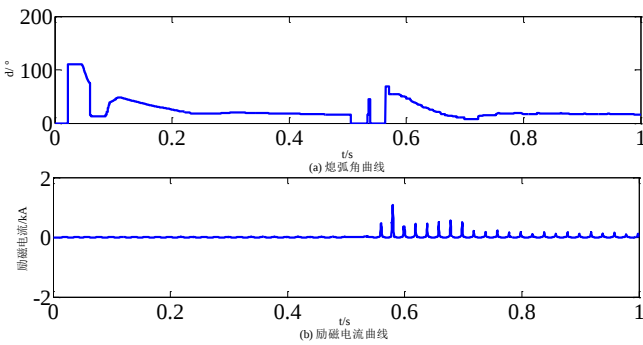


图 A2 点 F_1 发生故障时熄弧角和励磁电流曲线

Fig.A2 Curve of extinction angle and exciting current under fault occurring at F_1

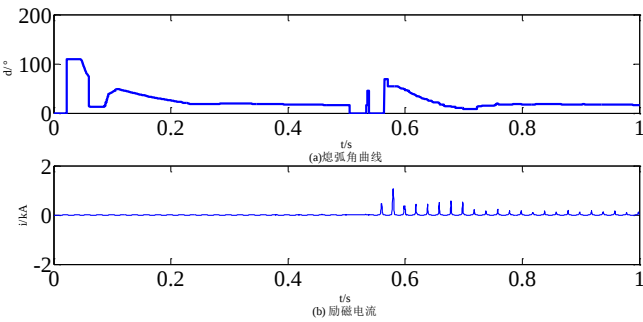


图 A3 点 F 发生故障时熄弧角和励磁电流曲线

Fig.A3 Curve of extinction angle and exciting current under fault occurring at F