

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.03.034

规模化电力电子装置接入对换流变保护策略的影响分析及对策研究

申洪明¹, 宋璇坤¹, 姚玉海², 杜娜¹, 李铁臣¹, 邹格¹

(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209; 2. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075)

摘要: 直流、新能源的大量接入,使得电网呈现出电力电子化特征。为了解决电力电子化装置大规模接入对现有换流变保护的影响问题,首先分析了现有换流变差动保护的适应性,然后研究了换流变两侧电流特征,最后提出了基于换流变两侧电流峰值构建新变压器的保护逻辑。新的保护方案在保证可靠性的基础上,同时能加快保护出口速度。基于PSCAD/EMTDC仿真结果验证了结论的正确性。

关键词: 电力电子装置; 换流变; 差动保护; 电流峰值

Effect of Large-scale Power Electronic Equipment on Converter Transformer Protection Strategy and Countermeasure

SHEN Hongming¹, SONG Xuankun¹, YAO Yuhai², DU Na¹, LI Tiechen¹, ZOU Ge¹

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. State Grid Beijing Electric Research Institute, Beijing 100075, China)

Abstract: Power electronics dominated power system is forming gradually with the use of HVDC and new energy. In order to solve the effect of Power electronics dominated power system on transformer protection, the adaption of converter transformer differential protection is first analyzed. Then the characteristics of the current on both sides of the converter transformer are studied. Finally, the new protection logic of transformer based on the peak value of the current on both sides of the converter transformer is proposed. The new protection scheme can not only ensure the reliability, but also speed up the output protection. Simulation results based on PSCAD/EMTDC prove the conclusion to be correct.

Key words: power electronic equipment; converter transformer; differential protection; current peak value

0 引言

随着传统直流、柔性直流、柔性控制设备、新能源及柔性负荷等大量的接入,中国源网荷特性都发生了巨大改变,电网呈现出明显的电力电子化特征。规模化电力电子装置的应用,一方面使得电网运行更加灵活,控制更加方便,但另一方面给电网的保护带来了一定的隐患^[1-4],故障类型和形式更加复杂多变^[5]。

关于电力电子装置规模化接入后对线路保护的影响的研究已经较多。文[6]研究了新能源场站送出线路中电流差动保护的适应性分析;文[7]研究

了LCC-HVDC逆变侧发生换相失败时对距离保护的影响,并提出了相应的解决措施;文[8]分析了DC/AC电源对基于故障分量方向元件的影响机理,指出逆变型电源可能会导致故障分量元件误动或拒动。

但目前关于规模化电力电子装置对换流变的影响研究较少,文[9]分析了换流变差动保护在区内单相接地故障、匝间故障以及外部故障时的动作特性,分析结果表明内部故障存在拒动的风险;文[10-11]集中研究了换流变励磁/和应涌流对变压器保护的影响,指出换流变存在误动的风险;文[12]研究了LCC-HVDC发生换相失败时对换流变主保护的影响,并提出了基于皮尔逊相关系数的解决方案;文[13]分析了换流变角侧CT饱和对桥差保护的影响,分析指

收稿日期:2019-11-05; 修回日期:2020-02-07

基金项目:2018年国网公司科技指南项目资助(面向柔性直流接入的交流侧保护控制设计技术研究)。

Project Supported by the Science and Technology Guide Project of State Grid Corporation (Research on New Protection Control Technology for AC Side of Flexible DC System).

出可能会引发桥差保护误动;文[14]详细分析了换流变中性点直流偏磁现象,指出通过加装隔离电容器阻止直流偏磁现象;文[15]综合研究了换流变差动类保护在交直流深度耦合系统下的动作性能。

文中详细研究了现有换流变保护配置方案在规模化电力电子装置接入下的适应性分析,分析指出由于换流阀、交直流滤波器、直流控制策略等相互耦合,存在换流变保护性能降低的风险。进而利用换流变两侧电流特征差异,提出了基于换流变两侧电流峰值特征的解决措施。新的解决措施在保证可靠性的基础上,保护出口速度相对加快。最后基于EMTDC/PSCAD仿真验证了分析结果的正确性。

1 换流变现有保护配置方案分析

目前电力系统电力电子装置主要是由于直流输电和新能源的广泛接入引起的。出了在传统直流(LCC-HVDC)场景下换流变的运行环境^[16]见图1。图1中:ACF表示交流滤波器;CF表示换流变网侧断路器; i_1 、 i_2 分别表示换流变两侧电流。通过图1可以看出,换流变既连接换流器,同时也连接交流滤波器与交流系统。现有换流变保护配置方案与常规变压器相同,都配有电气量保护与非电气量保护,电气量保护以基于稳态量差动保护为主保护,过流保护和零序过流保护为主要的后备保护。但在保护出口逻辑上略有不同,传统变压器保护一般是双套配置,采取“二取一”模式,而换流变作为直流成套设计的一部分,沿用了直流保护“三取二”的模式。

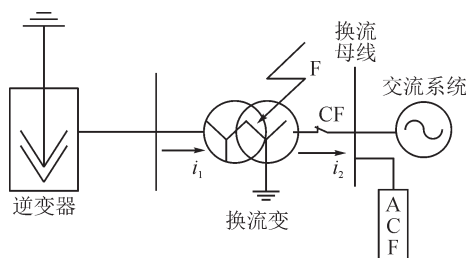


图1 LCC-HVDC下换流变运行环境架构图

Fig. 1 The converter transformer operating environment under LCC-HVDC

换流变无论连接的是传统直流还是柔性直流(VSC-HVDC),其基于稳态量的差动保护出口时间都远大于直流部分的保护动作时间,一般直流线路都配置行波保护,行波保护出口时间在5 ms左右,而对于换流阀本体故障,更需要立即更换备用阀体或者闭锁直流,因此换流变作为直流成套设计的一部分,相比于直流部分,其保护出口时间过于漫长。

由于直流系统保护动作速度远快于交流侧保护动作速度,因此当直流故障发生时,一般不会造成交直流保护失配现象。但交流侧故障时,由于切除时间相对较长,对直流侧保护控制会产生一定影响,如换流变故障切除时间越长,其引发直流电压等稳定问题的风险就越大,而且电力电子设备耐压通流能力受限,因此需要提高交流侧保护动作时间。同时换流变故障期间换流站涉及多种控制策略切换,交流侧保护动作时间越长,其动作性能收到挑战就越大。

换流变运行环境决定了换流变保护与直流控制策略、滤波器、交流系统等深度耦合,虽然现阶段实际工程中尚未出现换流变内部故障时差动保护动作性能下降或者拒动等现象,但也出现了一定的保护隐患。2013年天广直流受端A相接地故障时换流变三相差流波形见图2。通过图2可以看出,此时差流波形已偏于时间轴一侧,出现了类似涌流现象,可能会导致带2次谐波制动逻辑的差动保护性能下降。

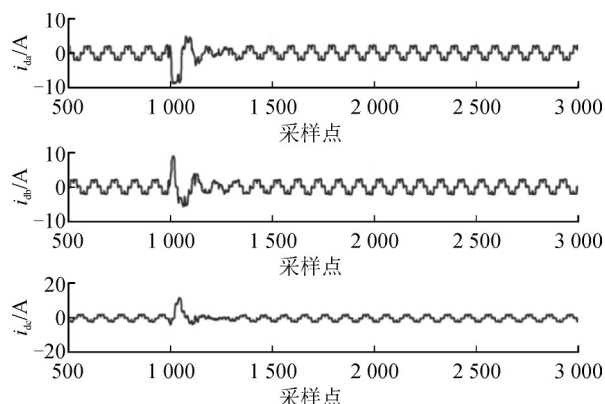


图2 换流变三相差流波形

Fig. 2 The waveform of three-phase differential currents

2 基于基波电流变化特征的解决措施

2.1 新保护原理的理论基础

事实上,即使换流变内部故障差动保护拒动,也可以通过后备保护延时动作将故障切除。但通过这些保护手段会进一步延长故障的切除时间,对直流系统的安全稳定运行非常不利。为此,文中提出了一种基于换流变两侧电流特征的解决措施,具体方案如下:

1)换流变发生内部故障时,无论所连接的换流器是常规直流还是柔性直流,当换流变发生内部故障时,换流变两侧短路电流 i_1 、 i_2 分别由换流器和交流系统提供,如图1所示。由于换流器受直流控制的影响,其短路电流特性与交流系统提供的短路电

流特性差异较大;

2)换流变发生外部故障时,换流变两侧电流 i_1 、 i_2 将由同一电源提供,在理想情况下,其幅值完全相同。

综合上述因素,提出了一种基于换流变两侧电流峰值比值的新型换流变保护原理,构建见式(1)

$$k = \frac{\max(i_1)}{\max(i_2)} \quad (1)$$

式(1)中: i_1 表示换流变阀侧电流; i_2 表示换流变网侧电流; k 表示两者的比值。

2.2 新保护方案的提出

在式(1)中,当换流变发生外部故障或者正常运行时, $k \geq 1$;当换流变内部故障时,当换流变连接的为传统直流时,由于低压限流环节的投入,使得换流器提供的短路电流降低,见图3(a),其最大幅值一般远小于网侧电流的最大幅值;当换流变连接的为柔直时,由于IGBT控制措施更加复杂,电流会在故障期间突增,因此 i_1 、 i_2 也会相差较大,见图3(b),即 k 与1相差很大。通过图3可以看出,虽然换流变连接的直流型式不同,但内部故障时两侧电流差异很大,而且其最大值差异明显。

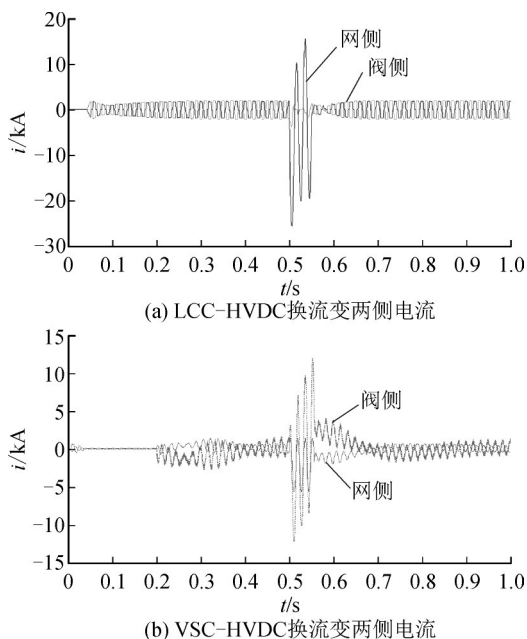


图3 不同直流接入下换流变两侧电流曲线

Fig. 3 The converter transformer currents under different DC environment

因此,为了区分换流变内、外部故障,文中提出了一种新的保护方案,见图4。图4中,为了防止CT传变、采样误差等因素可能引起保护误判,将 $0.8 < k < 1.2$ 判为换流变外部故障,保护不动作;否则,判为换流变内部故障,保护需出口动作。

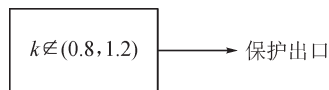


图4 新的保护出口逻辑

Fig. 4 The operate logic for new converter transformer

一般来说,故障后20 ms以内的电流一定会出现最大值。因此,相比于基于稳态量保护,新的保护逻辑在保护出口速度上有所提升。

3 仿真实验

基于CIGRE HVDC标准测试模型进行仿真验证,其中受端交流系统强度 $SCR=2.5$,换流变额定容量为591.79 MVA,变比为230 kV/209 kV。换流变有Y/D, Y/Yg两种接线方式,该次仿真以Y/Yg为例进行分析,故障时刻为0.3 s。

3.1 内部故障仿真验证

换流变发生A相外部接地故障时换流变两侧电流变化曲线见图5。网侧电流在0.308 s达到峰值35.788 kA,阀侧电流在0.311 s达到峰值5.279 kA,因此 $K=0.15$,根据图3所示的判据,保护能可靠动作。

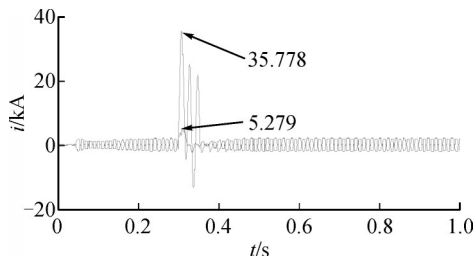


图5 内部故障仿真结果

Fig. 5 The simulation result under internal fault

3.2 外部故障仿真验证

换流变发生A相外部接地故障时换流变两侧电流变化曲线见图6。网侧、阀侧电流在0.312 s同时达到了电流峰值点,其中阀侧电流峰值为5.279 kA,网侧电流峰值为4.826 kA,因此 $K=1.09$,根据图3所示的判据,保护能可靠不动作。

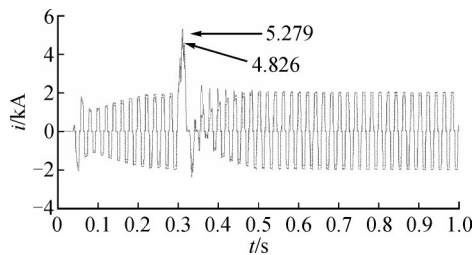


图6 外部故障仿真结果

Fig. 6 The simulation result under external fault

4 结论

文中分析了规模化电力电子装置接入对换流

变保护的影响,并提出了基于换流变两侧电流最大峰值的保护新方案,主要分析结论有:

1)换流变运行环境决定了直流控制策略、滤波器相互交织耦合,因此换流变的保护准确性受到了一定的挑战;

2)无论是传统直流还是柔性直流接入,其直流控制决定了其提供的短路电流特性跟交流系统提供的短路电流差异较大,因此可以基于换流变两侧电流特性构建保护新方案;

3)新的保护方案只需计算故障后1个周波内换流变两侧电流最大峰值,无需基于稳态量构建保护方案,原理简单,易于实现,在保证保护可靠性的基础上,也能加快动作速度。

参考文献:

- [1] 李 阳,王海云,武家辉,等.风火打捆交直流外送的运行切换控制策略[J]. 高压电器,2018,54(2):194-201.
LI Yang, WANG Haiyun, WU Jiahui, et al. Switching strategy of wind-thermal bundling control mode in AC/DC hybrid system[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(2): 194-201.
- [2] 宋国兵,陶 然,李 斌,等.含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与控制综述[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):2-11.
SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. Study of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12):2-11.
- [3] 文 安,邓 旭,魏承志,等.柔性直流输电系统交直流并行与孤岛运行方式间的切换控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):99-106.
WEN An, DENG Xu, WEI Chengzhi, et al. Switching control between AC-DC parallel and islanded operations of VSC-HVDC transmission system[J]. Electronic Power Automation Equipment, 2014, 34(7):99-106.
- [4] 于 洋,徐 谦,杨升峰,等.永磁直驱风机通过MMC-HVDC并网的故障穿越策略[J]. 高压电器,2017,53(10):150-157.
YU Yang, XU Qian, YANG Shengfeng, et al. Fault ride-through strategy for integration of permanent magnet direct-driven wind turbines via MMC-HVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10):150-157.
- [5] 马向南. ± 800 kV 楚雄换流站光流触发晶闸管故障分析及措施[J]. 高压电器,2017,53(11):236-245.
MA Xiangnan. Fault analysis and measures for light-triggered thyristor of ± 800 kV chuxiong converter[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11):236-245.
- [6] 李彦斌,贾 科,毕天姝,等.电流差动保护在逆变型新能源场站送出线路中的适应性分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):100-105.
LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Adaptability analysis of current differential protection of outgoing transmission line emanating from inverter-interfaced renewable energy power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12):100-105.
- [7] 费 彬,黄少锋,申洪明.交直流互联系统对距离保护的影响分析及对策[J]. 电力自动化设备,2015,35(8):15-21.
FEI Bin, HUANG Shaofeng, SHEN Hongming. Impact of AC-DC interconnected system on distance protection and countermeasure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8):15-21.
- [8] 李彦斌,贾 科,毕天姝,等.逆变型电源对故障分量方向元件的影响机理研究[J]. 电网技术,2017,41(10):3230-3236.
LI Yanbin, JIA Ke, Bitianshu, et al. Influence mechanism of inverter-interfaced renewable energy generators on fault component based directional relays[J]. Power System Technology, 2017, 41(10):3230-3236.
- [9] 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):123-132.
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 fault[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21):123-132.
- [10] 丁苏阳,林湘宁,翁汉琨,等.换流变零差保护在故障切除恢复性涌流期间的误动风险分析[J]. 电机工程学报,2017,37(s1):12-20.
DING Suyang, LIN Xiangning, WENG Hanli, et al. Mal-operation risk analysis on zero-sequence differential protection of converter substation during existence of recovery inrush due to fault removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(s1):12-20.
- [11] 陈 忠,张冬怡,李晓华,等.双端口断路器均压电容对换流变励磁涌流的影响[J]. 高电压技术,2017,43(10):3412-3418.
CHEN Zhong, ZHANG Dongyi, LI Xiaohua, et al. Influence of grading capacitor of double-break circuit on inrush current of converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10):3412-3418.
- [12] 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

(下转第252页)

- short - circuit impedance for power transformer with coupling FEM method of magnetic field and circuit[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 11-14.
- [17] 李晓松,陈乔夫,李荣华,等. 磁势不均布的变压器绕组漏电抗计算[J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 15-17.
LI Xiaosong, CHEN Qiaofu, LI Ronghua, et al. Calculation of leakage reactance for a transformer winding with uneven distribution of magnetic force[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(3): 15-17.
- [18] 井永腾,李 岩,额尔和木巴亚尔. 高压自耦变压器的涡流损耗计算与屏蔽措施[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1988-1993.
JING Yongteng, LI Yan, Eerhemubayeer. Eddy current losses calculation and shields of high voltage auto-transformer[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1988-1993.
- [19] 张卫纯,潘风明,张新根,等. 基于有限元法的电力变压器金属结构件损耗分析[J]. 高压电器, 2013, 49(11): 55-61.
ZHANG Weichun, PAN Fengming, ZHANG Xingen, et al. Power loss analysis for structural parts in transformer based on finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 55-61.
- [20] 张俊杰,李 琳,刘兰荣,等. 进入硅钢叠片内的漏磁通和附加损耗的模拟实验与仿真[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 148-153.
ZHANG Junjie, LI Lin, LIU Lanrong, et al. Measurement and 3D FEM analysis of additional loss in laminated silicon sheets caused by leakage flux[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 148-153.
- 张 彦(1988—),男,工程师,硕士,主要研究方向为变电运行、电气设备绝缘性能检测与故障诊断等方面的研究。
- 张宇巍(1992—),男,工程师,硕士,主要研究方向为电气设备绝缘性能检测与故障诊断等方面的研究。
- 杨旻宸(1988—),男,工程师,硕士,主要研究方向为变电运行、电气设备绝缘性能检测与故障诊断等方面的研究。
- 黄佳骏(1992—),男,工程师,硕士,主要研究方向为变电运行、电气设备绝缘性能检测与故障诊断等方面的研究。
- 蔡 磊(1983—),男,工程师,硕士,主要研究方向为变电运行、电气设备运行维护和状态检测等方面的研究。

(上接第233页)

- Power Systems, 2015, 39(23):158-164.
- [13] 张侃君,戚宣威,胡 伟,等. YD型换流变三角形绕组CT饱和对直流保护的影响及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20):99-105.
ZHANG Kanjun, QI Xuanwei, HU Wei, et al. Impact of the CT saturation of the delta winding on the HVDC protection and its countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20):99-105.
- [14] 刘青松,伍 横,彭光强,等. 南方电网所辖换流变压器直流偏磁数据分析[J]. 高压电器, 2017, 53(8):153-158.
LIU Qingsong, WU Heng, PENG Guangqiang, et al. Analysis of DC magnetic bias data of converter transformer in SCG[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 153-158.
- [15] 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.
- [16] 裴 岳,吕思颖,秦 昕,等. 特高压直流输电系统换流站故障过电压研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 149-154.
PEI Chan, LYU Siying, QIN Xin, et al. Study on the fault overvoltage of converter station of UHVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12):149-154.
- 申洪明(1988—),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制。
- 宋璇坤(1959—),女,教授级高工,主要研究方向为电力系统保护与控制。
- 姚玉海(1986—),男,博士研究生,主要研究方向为配电网控制。