

DOI: 10.7667/PSPC201646

YD型换流变三角形绕组CT饱和对直流保护的影响及对策

张侃君¹, 戚宣威², 胡伟¹, 张时耘^{3,4}, 陈堃¹, 尹项根^{3,4},

(1. 国网湖北省电力公司电力科学研究院, 湖北, 武汉, 430077; 2. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州, 310000; 3. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 4. 电力安全与高效湖北省重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 为提高直流换流器桥差保护的可靠性, 防止其在交流系统发生短路故障、励磁涌流等扰动期间误动, 提出了一种换流器桥差保护应对CT饱和的方法。理论分析与数字仿真表明, YD换流变阀侧三角形绕组在交流扰动期间流过零序环流将导致桥差保护出现虚假动作电流, 引发保护误动作。对此问题, 提出了通过引入三角形绕组零序环流作为制动量的桥差保护防误动策略, 并利用零序环流与桥差电流出现的相对时间差, 判断是否投入该防误动策略。仿真表明, 该方法能够在提高桥差保护在交流系统扰动期间可靠性的同时, 不影响桥差保护对于内部故障的灵敏度与动作速度。

关键词: 直流输电; 电流互感器; 暂态饱和; 桥差保护; 励磁涌流

Impact of the CT saturation of the delta winding on the HVDC protection and its countermeasure

ZHANG Kanjun¹, QI Xuanwei², HU Wei¹, ZHANG Shiyuan^{3,4}, CHEN Kun¹, YIN Xianggen^{3,4}

(1. State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310000, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 4. Electric Power Security and High Efficiency Laboratory (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to improve the reliability of the bridge differential protection for the DC converter, prevent the misoperation of the protection during short-circuit fault and the inrush current, the countermeasure for the CT saturation of the YD converter transformer of the bridge differential protection is proposed. The theoretical analysis and the simulation test disclose that the CT saturation in the delta winding of the YD converter transformer during the disturbance of the AC system will cause the false operation current, resulting in the misoperation. To solve this problem, the paper proposes a countermeasure that introducing the zero-sequence circulating current as the restraint current of the bridge differential protection. The time difference between the increase of the zero-sequence circulating current and the rise of the bridge differential current is utilized to determine whether to apply the proposed countermeasure. The simulation tests indicate that this countermeasure can improve the reliability of the bridge differential protection during the disturbance in the AC system, and meanwhile would not affect the sensitivity and the speed of the bridge differential protection for the internal fault.

Key words: HVDC transmission; current transformer; transient saturation; bridge differential protection; inrush current

0 引言

直流输电技术对于电能的大规模远距离输送、促进新能源的并网及消纳、提高区域交流互联电网的安全稳定性具有重要意义^[1-7]。随着“两个替代”战略的推进, 我国正逐步形成交直流高密度互联的

格局, 中东部负荷集中地区将有大规模的电能通过特(超)高压直流馈入。电网发生的单一故障若不能及时阻断, 将会在交直流系统间引起连锁演变的复杂事故过程, 甚至导致直流系统的紧急闭锁, 严重威胁交流直流互联大电网的安全稳定运行。继电保护作为电力系统安全防护的第一道防线, 其可靠迅速的动作对于遏制事故扩大发展、维护系统稳定运行至关重要。

近年来, 现场出现了多起交流系统发生短路故障、励磁涌流等扰动期间, 直流桥差保护^[8-11]以及

基金项目: 湖北省电力公司科技项目(鄂电科研(2014)第110号)

阀短路保护^[12-14]误动的事件, 导致了直流强迫停运等严重后果。分析表明, 由换流变阀侧(即换流器网侧)三角形绕组零序环流引起的互感器饱和是保护误动的主要原因。在实际的整流站中, 由于换流变到阀厅之间的空间十分有限, 难以在换流器网侧出口引线处直接安装互感器测量电流。测量换流器网侧电流的互感器为安装于换流变压器阀侧绕组处的套管互感器。对于 YD 型换流变, 互感器安装于三角形绕组内部, 其一次电流包括了三角形绕组的零序环流。在交流系统发生短路故障、励磁涌流等异常运行情况期间, 换流变三角形绕组将会流过含有非周期分量的零序环流, 进而导致互感器发生暂态饱和。在该情况下, 与饱和互感器相关的换流器保护, 如桥差保护和阀短路, 将面临不正确动作的风险。

针对此问题, 也有相关改进建议与措施被提出, 譬如: 更换暂态性能更好的电流互感器^[12,14]; 在换流变空投期间闭锁相关保护^[8,11,14]; 展宽保护动作时限^[13-14]、抬高保护动作门坎^[10]等。上述方法对于防止换流器保护误动有一定指导意义, 但实际应用中仍存在问题: 更换电流互感器增加了成本, 易受安装位置的限制, 且增加了二次系统施工和检修的难度; 在换流变空投期间短时闭锁保护并不能防止交流系统发生故障时导致的误动, 无法从根本上解决互感器饱和对保护的影响; 修改保护的动作时间和定值将有可能降低保护对内部故障的灵敏度和速动性。

本文结合理论分析与数字仿真对 YD 换流变三角形绕组互感器饱和机理及其对桥差保护的影响展开研究, 提出了通过引入三角形绕组零序环流作为制动量的改进策略, 以防止桥差保护在交流系统扰动期间误动。数字仿真表明所提方法能够有效提高桥差保护的可靠性, 同时能够在内部故障期间不影响桥差保护的灵敏度与速动性。

1 保护误动原因分析

1.1 桥差保护的逻辑

换流器桥差保护可以对换流桥的换相失败、阀短路、换流器直流侧出口高压端和中性端对换流器中点短路等故障提供安全防护, 是换流器的重要保护手段之一。

12 脉波换流器由两个 6 脉波换流器串联而成, 其交流侧通过换流变压器的网侧绕组并联, 如图 2 所示。其中一个换流变压器的阀侧绕组为三角形接线, 对应 D 型整流桥; 另一个为星形接线, 对应 Y 型整流桥。其中, Y 型整流桥的桥差保护判据为

$$I_{ac} - I_{acY} = \max(I_{acY}, I_{acD}) - I_{acY} > I_{set} \quad (1)$$

式中: I_{acY} 为 YY 换流变压器阀侧线电流整流值; I_{acD}

为 YD 换流变阀侧线电流整流值; 数字整流算法为取三相线电流绝对值的最大值; I_{ac} 为 I_{acY} 和 I_{acD} 中的较大值; I_{set} 为桥差保护动作定值, 一般取 0.07 倍额定直流电流, 本文以龙政直流输电工程为例开展研究工作, 其额定直流电流为 3 kA, 故 I_{set} 等于 0.21 kA。

同理, D 型整流桥的桥差保护动作判据为

$$I_{ac} - I_{acD} = \max(I_{acY}, I_{acD}) - I_{acD} > I_{set} \quad (2)$$

根据现场实际配置情况, 桥差保护的动作延时为 200 ms, 采用累积法计算保护的動作时间, 具体的计算方法为: 每隔采样时间 T_s , 对判据(1)和判据(2)进行计算, 判断桥差保护的動作量是否大于动作定值 I_{set} 。如果判据满足, 则将内部计数器加 20; 如果小于定值, 将内部计数器减 1, 如果计数器内的计数值 Z 大于 20 倍的定值 t_{set} 除以采样时间 T_s , 即 $Z > 20 \times t_{set} / T_s$, 则保护出口。桥差保护延时处理的示意如图 1 所示。

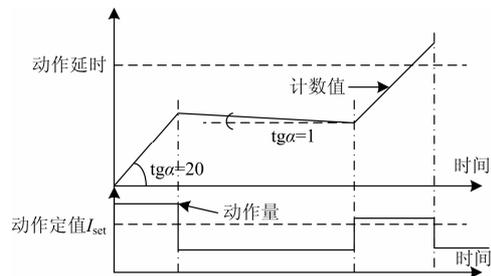


图 1 桥差保护延时的计算方法

Fig. 1 Time delay algorithm of the bridge differential protection

1.2 三角形绕组互感器饱和对桥差保护的影响

由于现场空间有限, 换流变阀侧电流互感器为安装于换流变内部的套管互感器。如图 2 所示, 对于 YD 换流变, 阀侧互感器的一次电流包括了三角形绕组的零序环流。因此, 需要对三角形绕组的测量电流进行相线变换, 即将三相绕组电流两两作差得到线电流, 以构成桥差保护判据所需的换流变阀侧线电流。

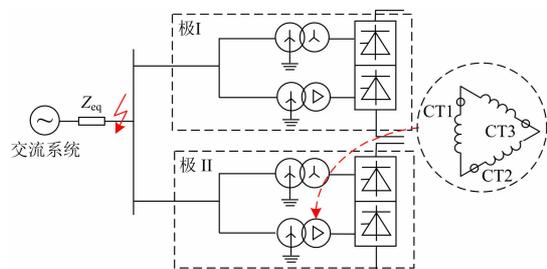


图 2 换流变阀侧互感器的安装位置

Fig. 2 Installation location of CTs on the valve side of the converter transformer

在交流系统发生故障或者换流变空投期间, YD 换流变的三角形绕组将会流过含有非周期分量的零

序环流, 易导致安装于绕组处的套管互感器发生饱和, 进而导致桥差保护误动作。下文通过数字仿真展开分析。

如图 3 所示, 假设在交流系统在 0 s 时刻发生持续 0.5 s 的不对称故障期间, 零序故障电流将流经 YD 换流变的三角形绕组, 三角形绕组上某一个互感器由于存在剩磁等原因率先进入了饱和状态, 如图 3(a)所示, 而另外两相的互感器尚未饱和。在该情况下, 通过相-线变换得到的阀侧线电流整流值 I_{acD} 开始增大, 而此时 YY 变压器的阀侧线电流整流值 I_{acY} 变化并不明显, 如图 3(b)所示。根据如式(1)所示的 YY 型整流桥的桥差保护动作判据, 动作电流将大于定值 $I_{set}(0.21\text{kA})$, 如图 3(c)所示。桥差保护的判据在故障后一段时间内将长时间满足, 如图 3(d)所示。在 0.24 s 时, 保护的累积动作时间大于整定的动作时延 0.2 s, 此时桥差保护将发生误动, 导致正常运行的换流极闭锁停运。

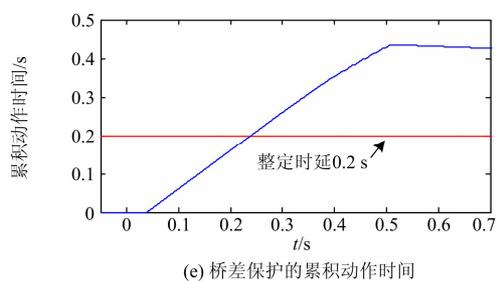
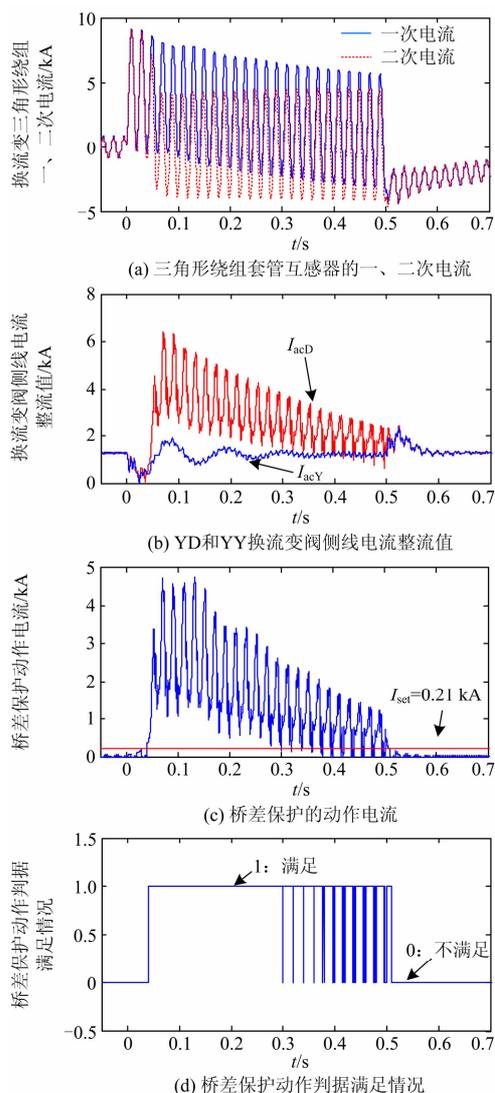
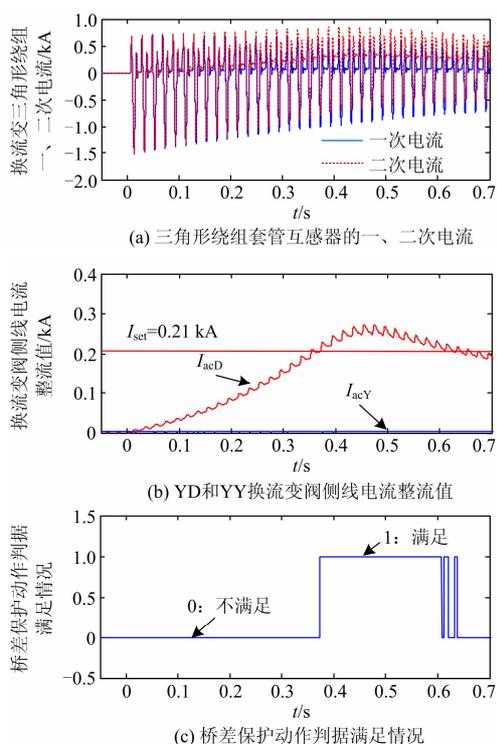


图 3 交流系统故障期间, YD 换流变三角形绕组套管 CT 饱和对桥差保护的影响

Fig. 3 Influence of the CT saturation in the delta winding of the YD converter transformer on the bridge current differential protection when a fault occurs in the AC system

下面分析换流变发生励磁涌流期间桥差保护的动特性。假设极 II 从备用闭锁状态, 极 II 换流桥所连的两台并联变压器在 0 s 时合闸至交流系统。空投励磁涌流的零模分量会流经 YD 换流变的三角形绕组, 并导致其中某相套管互感器率先发生暂态饱和, 如图 4(a)所示。在该情况下, 通过相-线变换得到的阀侧线电流整流值 I_{acD} 开始增至大于动作定值 $I_{set}(0.21\text{kA})$, 而 YY 变压器的阀侧线电流整流值 I_{acY} 由于极 II 尚未运行而等于零, 如图 4(b)所示。故 YY 型整流桥的桥差保护动作判据将被持续满足, 如图 4(c)所示。在 0.57 s 时, 保护的累积动作时间大于整定的动作时延 0.2 s, 此时桥差保护将发生误动, 如图 4(d)所示。此时, 桥差保护的误动将导致极 II 投运失败。



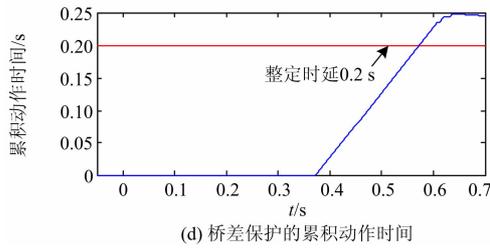


图4 换流变励磁涌流期间，YD换流变三角形绕组套管CT饱和对桥差保护的影响

Fig. 4 Influence of the CT saturation in the delta winding of the YD converter transformer on the bridge current differential protection when the converter transformer is energized

2 桥差保护的防误动策略

2.1 引入零序环流作为制动量

如式(1)和式(2)所示，桥差保护判据中的动作量为固定值，无法根据实际情况自适应的调整动作电流大小，这使得桥差保护难以在交流系统故障以及换流变励磁涌流等复杂运行工况期间保持较高的可靠性。参考交流系统差动保护制动电流的选取原则：在正常运行和外部故障时制动作用增强防止保护误动作；在故障时制动作用减弱，以提高保护灵敏度。由上节的分析可知，三角形绕组零序环流导致的互感器饱和为桥差保护误动的主要原因，故可以考虑引入零序环流作为制动量。在发生交流系统故障以及换流器励磁涌流期间，可能存在较大零序环流导致互感器饱和，引入零序环流可以抬高动作门坎以防止保护误动。在换流器发生故障期间，由于换流变阀侧绕组分别为三角形接线和星型不接地接线，因此故障产生的零序电流无法流入换流变压器，此时换流变三角形绕组的零序环流较小。根据上述分析可见，引入零序环流作为制动量可以同时兼顾桥差保护在内部故障期间的灵敏度以及外部故障期间的可靠性。

修改后的Y型整流桥桥差保护动作判据为

$$I_{ac} - I_{acY} = \max(I_{acY}, I_{acD}) - I_{acY} > \max(I_{set}, k_{rel} \cdot I_{0m}) \quad (3)$$

式中： k_{rel} 为制动系数，在本文中取0.5； I_{0m} 为三角形绕组零序环流的有效值，零序环流可以通过对三角形绕组的三相电流进行求和获取。

2.2 桥差保护防误动策略的投入判据

2.1小节提出引入三角形绕组零序环流作为保护制动量。但是，该改进措施在提高桥差保护可靠性的同时，也将会降低桥差保护在换流桥发生故障期间的灵敏度与动作速度。因此需要研究上述改进判据的投入条件，在内部故障期间尽量不投入改进判据，而在其他非正常运行工况期间投入改进判据。

交流系统发生短路故障与励磁涌流期间，三角

形绕组的零序环流几乎与故障时刻或者励磁涌流的发生时刻同步，而互感器进入饱和需要经过一定的时间，所以桥差保护动作电流的增大时刻将滞后于三角形绕组零序环流的产生时刻。

当换流桥发生的内部故障时，桥差保护动作判据将会在故障发生时刻马上满足。换流变阀侧绕组分别为三角形和星型不接地接线，故障产生的零序电流将无法流入换流变。但是在该情况下，换流变的三角形绕组也有可能产生环流，这是因为故障期间换流变由于偏磁的作用发生了饱和，产生的部分零模励磁电流将流过三角形绕组。考虑到变压器进入饱和状态也需要一定的时间，故三角形绕组零序环流的产生时刻将滞后于桥差保护动作判据的满足时刻。

综上所述，可以根据零序环流的产生时刻与桥差保护动作判据满足时刻之间的相对时间关系确定是否投入桥差保护的防误动判据。当零序环流的产生时刻超前于桥差保护的满足时刻时，则认为发生了外部故障或者励磁涌流等异常运行工况，此时投入防误动策略，以提高桥差保护的可靠性；反之，则判断发生了内部故障，按照原有的动作特性切除故障。

2.3 保护实施方案

根据2.1小节和2.2小节所述的桥差保护防误动方法，形成具体实施方案，主要包括如下三个步骤。

步骤1：判断YD换流变三角形绕组是否流过零序环流

当式(4)所示的判据满足时，启动桥差保护防误动判据，并记录时刻 t_1 。此时，换流变三角形绕组产生了零序环流，位于三角形绕组的套管互感器有可能发生饱和导致桥差保护误动。

$$I_{0m} > 0.2 \text{ kA} \quad (4)$$

步骤2：判断是否发生内部故障

判断在 $(t_1, t_1 + \Delta t)$ 时间段内，式(1)和式(2)所示的桥差保护动作判据是否满足。如果动作判据满足，则认为换流器发生了内部故障，此时不投入防误动策略，桥差保护仍采用原有的动作特性。如果在该期间内动作判据没有满足过，则转入步骤3。

一般情况下，电流互感器进入饱和需要5ms，故 Δt 可以取5ms。

步骤3：投入桥差保护防误动判据

投入桥差保护的防误动判据，通过引入零序环流作为制动电流，以防止桥差保护因三角形绕组侧互感器发生饱和而误动。

3 仿真实验

应用本文所提的防误动策略，对图2所示的交

流系统故障期间桥差保护的動作特性展开仿真验证, 结果如图 5 所示。在 0 s 时刻交流系统发生不对称故障瞬间, YD 型换流变压器的三角形绕组立刻产生了零序环流, 如图 5(a)所示。在随后的 5 ms 内, 互感器尚未进入饱和状态, 原有的桥差保护判据并未满足, 故投入桥差保护防误动策略。在 0.04 s 时, 由于互感器发生了饱和, 桥差保护的差动电流

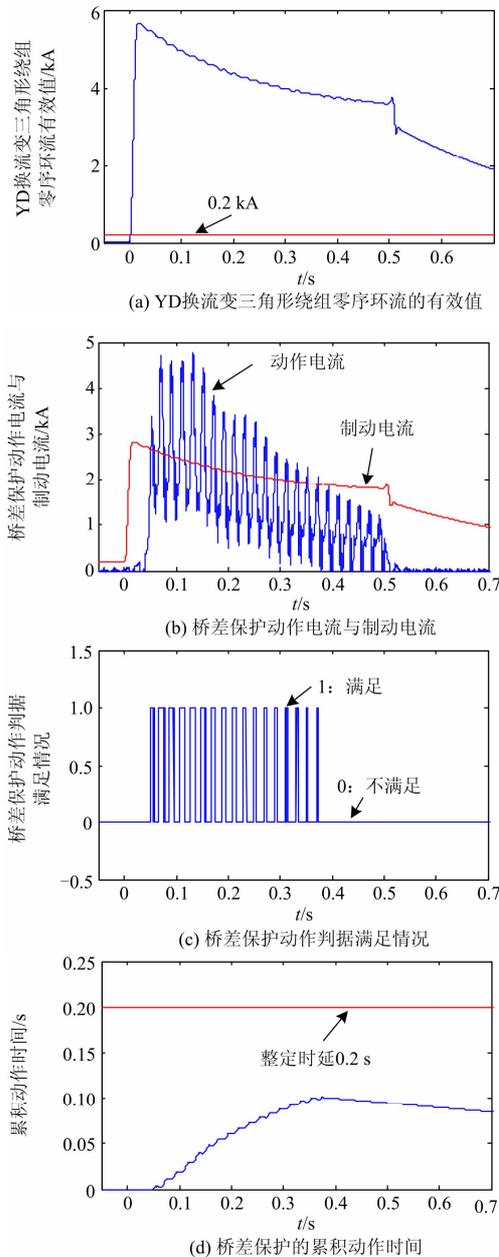


图 5 交流系统发生不对称故障期间, 桥差保护防误动策略的動作情况

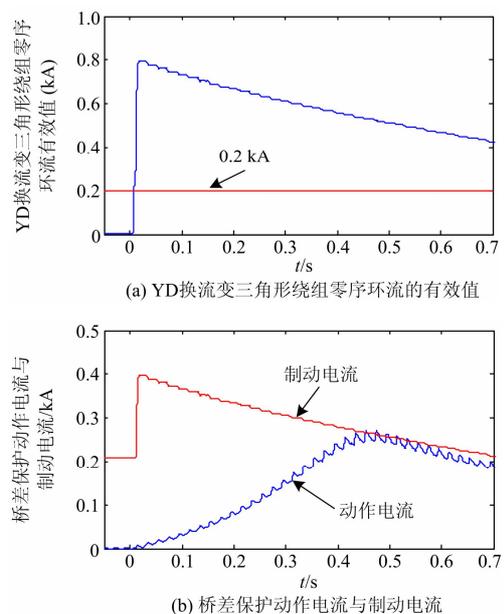
Fig. 5 Simulation results of the proposed method for preventing the misoperation of the bridge current differential protection when an asymmetric fault occurs in the AC system

开始增加。在该情况下, 桥差保护防误动判据投入, 通过引入零序环流作为制动量, 能够大幅减少满足桥差保护动作判据的点数, 如图 5(b)和(c)所示。此时, 桥差保护的累积动作时延小于整定值, 从而能够躲过误动, 如图 5(d)所示。

针对如图 3 所示的换流变空投励磁涌流导致桥差保护误动的情况, 所提应对策略的仿真结果如所示。在 0 s 时刻, 极 II 换流变空投, 随即 YD 型换流变压器的三角形绕组即产生了零序环流, 如图 6(a)所示。在之后的 5 ms 内, 原有的桥差保护判据并未满足, 故开始投入桥差保护防误动策略。通过分析可见, 引入零序环流作为制动量, 能够大幅减少满足桥差保护动作判据的点数, 从而避免桥差保护误动。

通过上述分析可见, 本文所提的桥差保护防误动策略能够在交流系统发生不对称故障以及换流变励磁涌流等异常运行工况期间有效提高桥差保护的可靠性。

在换流桥阀侧引线处发生内部故障期间, 桥差保护的仿真结果如图 7 所示, 故障发生时刻为 0 s。在内部故障发生的瞬间, 桥差保护的動作电流迅速增大, 保护的動作判据立刻满足, 如图 7(b)和(c)所示。在 0.2 s 时, 换流变由于故障所产生的偏磁作用而进入了饱和状态, 其三角形绕组才开始产生零序环流, 图 7(a)所示。此时, 零序环流出现的时刻滞后于桥差保护判据满足的时刻, 故桥差保护的防误动策略将不投入, 桥差保护可以按照原有的動作特性, 灵敏、迅速的切除故障。



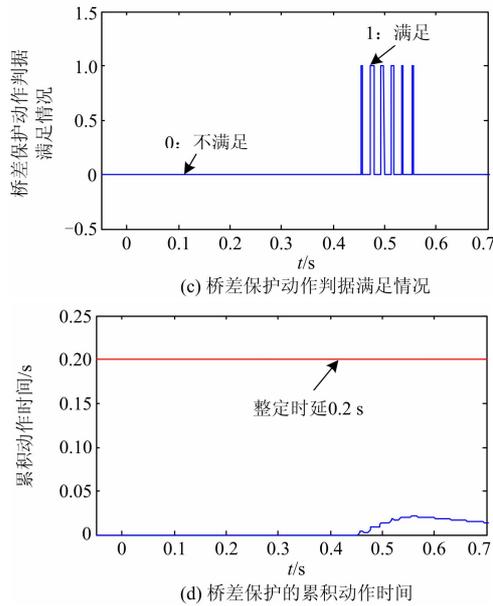


图 6 换流变空投期间，桥差保护防误动策略的动作情况
 Fig. 6 Simulation results of the proposed method for preventing the misoperation of the bridge current differential protection when the converter transformer is energized

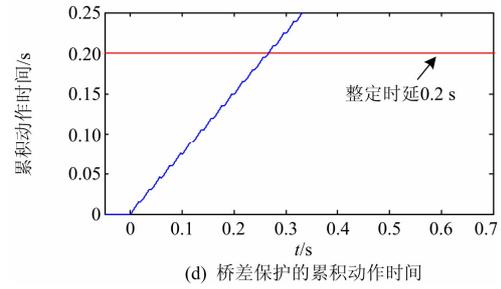
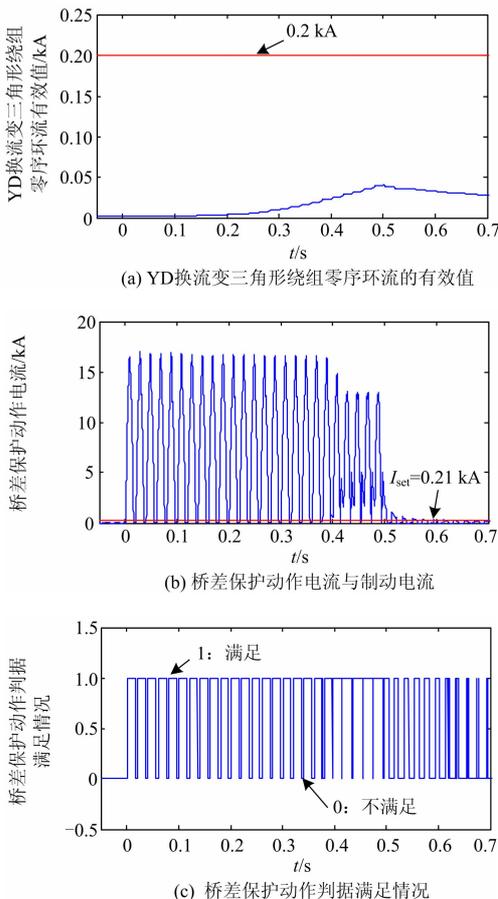


图 7 换流器发生内部故障期间，桥差保护防误动策略的动作情况

Fig. 7 Simulation results of the proposed method for preventing the misoperation of the bridge current differential protection when an internal fault occurs in the converter

4 结论

随着直流建设的迅速推进，我国正逐步形成交流直流高密度互联的格局，这使得电网故障特性和演化过程更加复杂，同时带来了交直流系统保护协调配合的新课题。由此对电力系统继电保护提出了新的挑战。

在直流输电工程中，YD 换流变阀侧(即换流器网侧)CT 为安装于三角形绕组的套管 CT，在交流系统发生短路故障、励磁涌流等扰动期间，三角形绕组将产生零序环流，并会引起互感器饱和，使得与该饱和互感器相关的保护，譬如直流桥差保护，发生误动，导致直流闭锁，严重威胁交直流混联输电系统的安全稳定运行。对此问题，论文提出了通过引入零序环流作为制动量的桥差保护防误动策略，并利用零序环流与桥差电流出现的相对时间关系，判断是否投入该防误动策略。在交流系统发生扰动期间，通过引入零序环流能够提高桥差保护的動作门坎值，从而有效改善桥差保护的可靠性；在发生内部故障期间，由于零序环流出现的时间晚于桥差电流增大时刻，所提的防误动策略不会被投入，故桥差保护可以按照原有的動作特性切除故障。仿真表明，该方法能够在提高桥差保护在交流系统扰动期间可靠性的同时，不影响桥差保护对于内部故障的灵敏度与動作速度。

参考文献

[1] 高强, 林焯, 黄立超, 等. 舟山多端柔性直流输电工程综述[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(2): 33-38.
 GAO Qiang, LIN Ye, HUANG Lichao, et al. An overview of Zhoushan VSC-MTDC transmission project[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(2): 33-38.

- [2] 滕松, 宋新立, 李广凯, 等. 模块化多电平换流器型高压直流输电综述[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(8): 43-50.
TENG Song, SONG Xinli, LI Guangkai, et al. A survey on HVDC transmission with modular multilevel converters[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(8): 43-50.
- [3] 吴彦维, 李晔, 陈大鹏, 等. 10000 MW 特高压直流工程受端分层接入交流电网方式下直流控制系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 108-113.
WU Yanwei, LI Ye, CHEN Dapeng, et al. Research on control system for 10000 MW UHVDC station B hierarchical connection to AC grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 108-113.
- [4] 钟显, 樊艳芳, 王一波, 等. 含高密度风电、交直流送端电网直流闭锁故障稳控方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 130-138.
ZHONG Xian, FAN Yanfang, WANG Yibo, et al. Research of stability control strategies for high density wind power, AC-DC sending grid bipole trip[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 130-138.
- [5] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 多馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 142-148.
LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 142-148.
- [6] 史宗谦, 贾申利. 高压直流断路器研究综述[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 1-9.
SHI Zongqian, JIA Shenli. The research on HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 1-9.
- [7] 陈干, 田方, 刘宁, 等. 高压直流输电工程换相失败研究[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 136-140.
CHEN Gan, TIAN Fang, LIU Ning, et al. Research on HVDC transmission project commutation failure[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 136-140.
- [8] 郑伟, 张楠, 周全. 和应涌流导致直流闭锁极保护误动作分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 119-124.
ZHENG Wei, ZHANG Nan, ZHOU Quan. Analysis of DC blocked pole protection misoperation caused by sympathetic inrush current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 119-124.
- [9] 朱韬析, 王超, 张雪松, 等. 浅析空载投入换流变压器对直流输电系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 108-112.
ZHU Taoxi, WANG Chao, ZHANG Xuesong, et al. Analysis of impacts on HVDC transmission systems when converter transformers are energized[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 108-112.
- [10] 刘敏, 张楠, 邹卓霖, 等. 直流保护系统 CT 饱和引起直流工程桥差保护误动分析及改进措施[J]. 继电器, 2007, 35(21): 10-13.
LIU Min, ZHANG Nan, ZOU Zhuolin, et al. Analysis of a unwanted trip of the bridge differential protection caused by CT saturation state and its improved ways[J]. Relay, 2007, 35(21): 10-13.
- [11] 瞿少君. 励磁涌流导致的换流器桥差保护动作分析[J]. 云南电力技术, 2010, 38(4): 86-87.
QU Shaojun. Action analysis on differential protection of converter bridge caused by inrush current[J]. Yunnan Electric Power, 2010, 38(4): 86-87.
- [12] 汪道勇, 黄道春, 崔雨, 等. 葛洲坝换流站 D 桥差动保护动作原因及整改[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1504-1508.
WANG Daoyong, HUANG Daochun, CUI Yu, et al. Reasons of differential protection action and reform measures for Gezhouba converter station D bridge[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1504-1508.
- [13] 田庆, 原敏宏, 成小胜. 葛南直流阀 D 桥差动保护误动作分析[C] // 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会, 北京, 2008.
- [14] 田庆, 王晓希. 换流阀三角形侧零序环流对阀短路保护的影响[J]. 高压电器, 2008, 44(6): 509-512, 515.
TIAN Qing, WANG Xiaoxi. Influence of converter transformer D-bridge zero sequence circulating current on valve short circuit protection[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6): 509-512, 515.

收稿日期: 2016-03-31; 修回日期: 2016-06-18

作者简介:

张侃君(1977-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护与自动控制的研究和生产工作;

戚宣威(1988-), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 主要从事电力系统保护与控制的研究工作; E-mail: 814512663@qq.com

胡伟(1981-), 女, 博士, 工程师, 主要从事直流输电系统控制与保护技术研究。

(编辑 张爱琴)